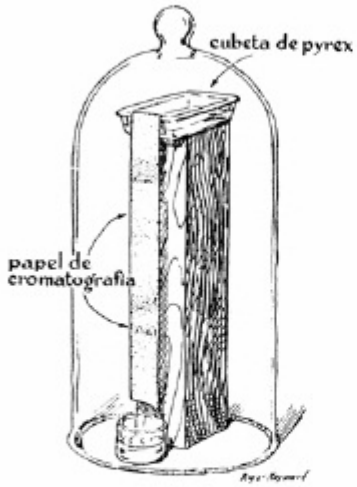
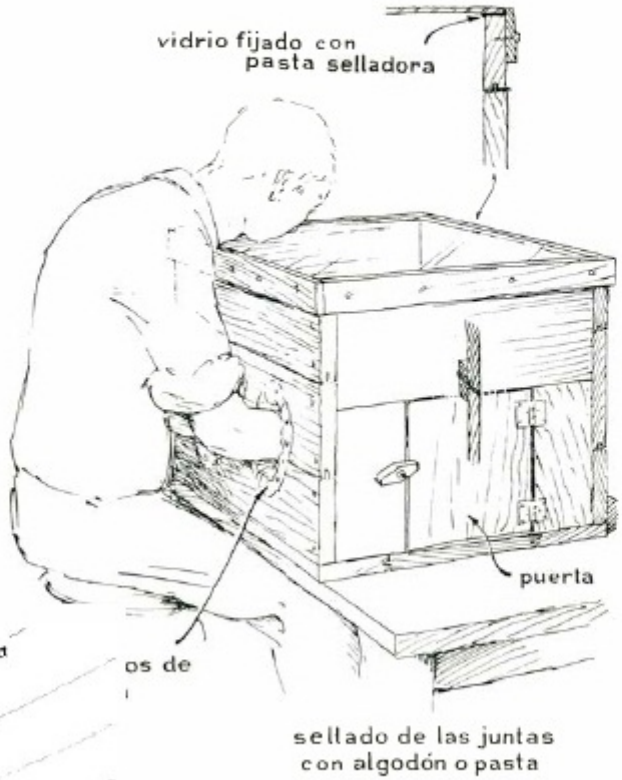
1976-1980

Taller y laboratorio 1

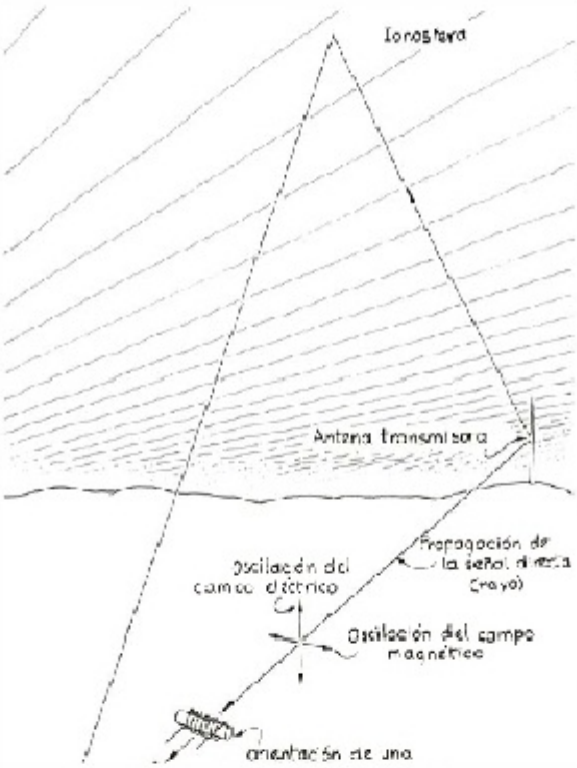


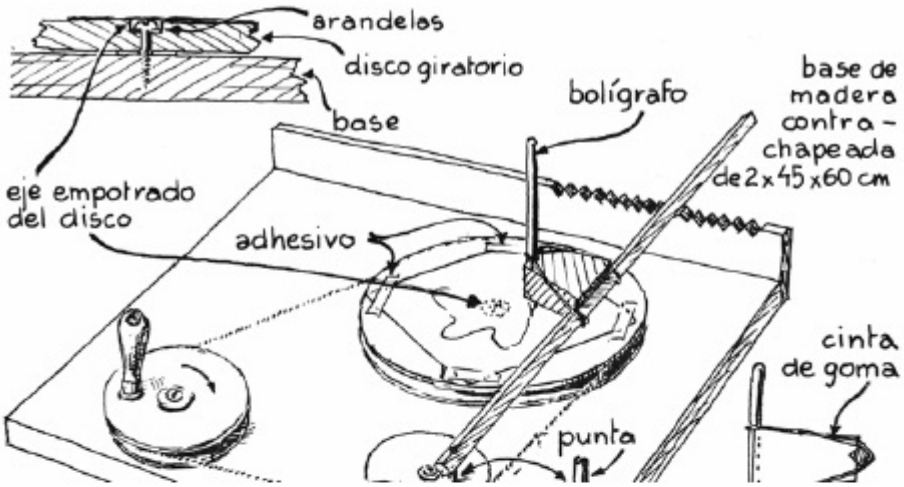
Cromatografía sobre papel (realizada en una cámara para evitar la evaporación de la muestra).

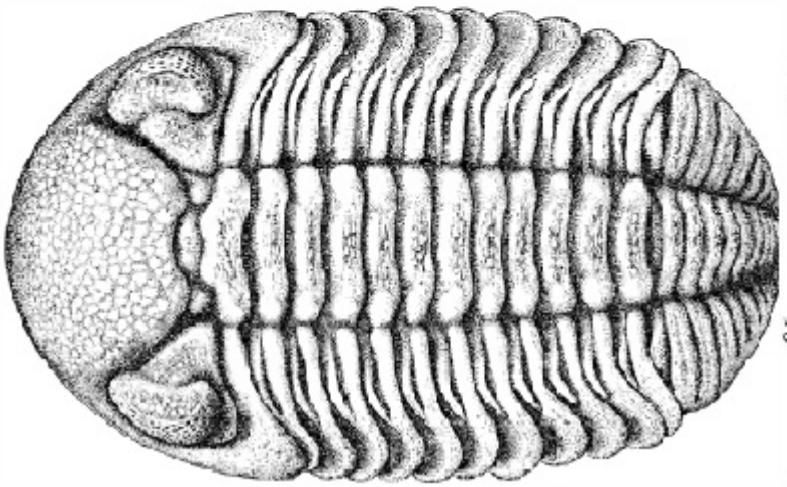


siembras estéril cuya construcción es, además, relativamente sencilla.

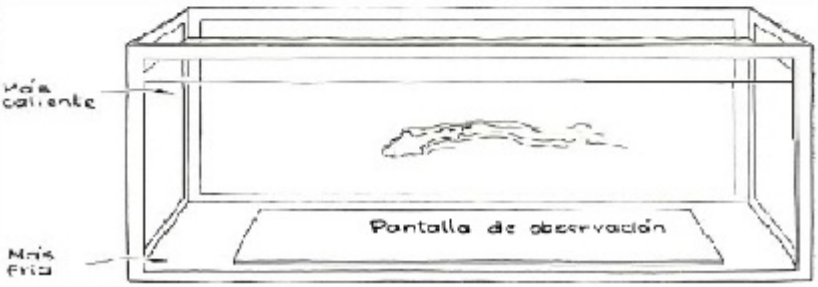
Cristales de plata en gel de sílice







Phacops rana milleri, *trilobite del Devónico medio*



Lámparas y filtros polarizadores montados en un cesto

EX LIBRIS Scan Digit

The Doctor

http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/

http://el1900.blogspot.com.ar/

http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/

https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/

Taller y laboratorio Indice

1976
Armonigramas, Dispositivos Mágicos que las dibujan, C. L. Stong; diciembre 1976, pág. 106.
Bacterias inocuas, C. L. Stong; noviembre 1976, pág. 174.
Cromatografía, Una Poderosa Técnica Analítica, C. L. Stong; octubre 1976, pág. 118.
1977
Arco iris en una sola gota de agua, Jearl Walker: septiembre 1977, pág. 114.
Bandas de Liesegang en color, C. L. Stong: mayo 1977, pág. 109.
Cometas, fabricación .r vuelo, C. L. Stong; abril 1977, pág. 108.
Congelación del agua caliente, Jearl Walker: noviembre 1977, pág. 170.
Cría de caracoles en casa, C. L. Stong; junio 1977, pág. 102.
Generador electrostático de Van de Graaf, C. L. Stong: enero 1977, pág. 102.
Un Inclinómetro sensible de mercurio, C. L. Stong: octubre 1977, pág. 102.
Manantial salino, El, Jearl Walker: diciembre 1977, pág. 116.
El microscopio simple de Antón Leeuwenhoek. C. L. Stong: marzo 1977, pág. 110.
Motores electrosráticos, C. L. Stong; agosto 1977, pág. 108.
Planear suspendido o esquiar por el cielo, C. L. Stong: julio 1977, pág. 110.
Regisrrador gráfico casero, C. L. Stong: febrero 1977, pág. 92.
1978 por: Jearl Walker
Atractivo de la llama de una vela realizado por la fisica y la química; junio, pág. 114
Colores brillantes de una pompa de jabón producen inferencia ondulatoria; noviembre, pág. 156.
Cometas Musha y otras para construir y hacer volar; abril, pág. 108.
Cómo pulir cristales a mano, y mejorar la eficacia de las chimeneas caseras; octubre, pág. 103.
Estudio de la luz polarizada; febrero, pág. 121.
Flotación de gotas en su propio medio; agosto, pág. 100.
Ilusiones ópticas al colocar un filtro obscuro en uno de nuestros ojos, mayo; pág. 110.
Lo que los penachos de humos nos dicen sobre las caracterfsticas de la atmósfera; julio, pág. 102.
Maravillas de la fisica; enero, pág. 102.
Polarizadores y cómo usarlos; marzo, pág. 112.
Salas de los secretos y reflexiones de los sonidos; diciembre, pág. 104.
Sistemas químicos que permiten oscilar de un color dado a otro; septiembre, pág. 108.
1979 por: Jearl Walker
Cómo construir un sencillo sismógrafo para registrar temblores de tierra; septiembre, pág. 119.
Cómo construir y mantener en vuelo los bumerangs; mayo, pág. 116.
Cómo hacer campanas y cortinas de agua con cuchillos y cucharas; octubre, pág.128.
Cómo medir el tamaño de la Tierra con sólo una mira o un cronómetro; julio. pág. 120.
Chimeneas y puntas de los lápices se fracturan de la misma forma; abril pág. 108.
Detector de radiaciones con láminas de aluminio y una lata; noviembre, pág 184.
Efecto Moiré, el caleidoscopio y otros juguetes ópticos de la época victoriana; febrero, pág.112.
Experimentos con Polyox, masilla casera y otros fluidos no newtonianos; enero, pág. 102.
Método de Edwin Land para obtener calor a partir del blanco y negro; agosto, pág. 122.
Microfotografias con un equipo sencillo y económico; marzo, pag. 120.
"Rattleback", una piedra que invierte su giro; diciembre, pág. 116.
Relación entre bumerangs y pelotas de golf junio, pág. 104.
Sismógrafo para registrar temblores de tierra; septiembre, pág. 119.
1980 por Jearl Walker
El judo logra que los débiles compitan con los fuertes; septiembre, pág. 110.
Espectrofotómetro casero que examina en un treintavo de segundo; marzo, pág. 128.
Exibiciones con láser, en las que se vierte luz sobre luz; octubre, pág. 120.
Fantasías en la nieve: pasatiempos con el puntuado caótico de las pantallas de televisión; julio, pág. 116.
Física y química de una salsa bearnesa fallida; febrero, pág. 111.
Ilusiones ópticas creadas por composición puntual y "nieve" de la pantalla del televisor; junio, pág. 122.
Láser casero que emite verde y anaranjado a la vez; diciembre, página 130.

Taller y laboratorio Indice

Llamas en las que el aire se introduce en un gas inflamable; enero, pág. 114.
Misterios del arco iris. Sus bellos arcos supernumerarios; agosto, pág. 114.
Seguimiento del oleaje ionosférico a través de radios de transistores; noviembre, pág. 164.
Sistemas para construir hologramas; abril, pág. 118.
Trilobites y crinoideos fósiles; mayo, pág. 120.

Taller y laboratorio

Un sencillo experimento para iniciarse en una poderosa técnica analítica: la cromatografía

Durante los últimos años, millares de aficionados han descubierto el interés de la cromatrografía, o "análisis por adsorción", como se le ha denominado en algunas ocasiones. A pesar de que el botánico ruso Michael Tswett describió el método cromatográfico en 1906, no se generalizó su uso, ni siquiera entre los profesionales, hasta 1930.

Ninguna descripción del método cromatográfico ha sobrepasado en claridad y concisión a la dada originalmente por Tswett: "Si una solución de clorofila en éter de petróleo se filtra a través de una columna de un adsorbente (yo uso generalmente carbonato cálcico, que comprimo fuertemente en el interior de un estrecho tubo de cristal), los pigmentos se separan de arriba abajo, de acuerdo con la secuencia de adsorción, en varias zonas coloreadas, como los rayos de luz en el espectro, de forma que los diferentes componentes de una mezcla de pigmentos se resuelven en una columna de carbonato cálcico de acuerdo con una ley y pueden ser valorados sobre ella cualitativa y cuantitativamente. A tal preparación yo le llamo un cromatograma, y, al método correspondiente, el método cromatográfico. Es evidente que el fenómeno de adsorción descrito no se restringe a los pigmentos de la clorofila, y se ha de suponer que todas las clases de compuestos químicos, coloreados y no coloreados, están sujetas a las mismas leyes."

En esencia, la cromatografía sólo requiere tres aparatos: un recipiente para contener la muestra, la columna cromatográfica y un segundo recipiente para recoger el líquido usado a medida que gotea por el final del tubo. Después de rellenar la columna con un material adsorbente, se coloca en la parte superior del tubo una porción de la solución de muestra y se deja que descienda a través de la columna, entre una décima y una cuarta parte de su longitud. Al hacer esto, normalmente se forma una banda uniforme del color característico de la solución que se está estudiando. Entonces se hace pasar disolvente de lavado a través de la columna, y comienza el proceso de separación. Cada substancia tiene unas afinidades características por el disolvente y por el adsorbente. Los expertos suelen denominar a esta propiedad la "actividad" del adsorbente o del disolvente. La relación de actividades determina la posición que una substancia particular ocupará en la columna respecto a las restantes de la mezcla de la que está siendo separada. Las substancias menos solubles y con mayor afinidad por el adsorbente quedan adheridas a las partículas superiores de la columna. Aquellas de menor afinidad por el adsorbente serán lavadas más rápidamente, dependiendo su desplazamiento de la adsorción relativa de cada substancia. Las substancias así separadas formarán en la columna un patrón característico de bandas. Por ejemplo, los extractos preparados a partir de algunas hojas verdes presentan más de veinte bandas de colores diferentes, desde verde oscuro hasta blanco, pasando por varios tonos de anaranjado, rosa, amarillo y violeta suave. Estos colores corresponden a las diversas xantofilas, flavoxantinas, luteínas, carotenos y pigmentos afines.

La operación de lavar la columna con disolvente limpio se conoce como "desarrollo" de la columna. Cuando un solvente nuevo circula a través de una columna, algunas moléculas se desprenden del adsorbente, se incorporan a la solución y bajan a regiones de concentración menor. Allí son readsorbidas. Las actividades del solvente y del adsorbente varían según la concentración de la substancia que se está analizando; asi, al repetirse el proceso expuesto, una substancia puede entrar y salir de la solución varias veces en el curso de su descenso a través de la columna. Al principio, las bandas son estrechas y están agrupadas cerca del principio del tubo. A medida que avanza el desarrollo de la cromatografía, todas las bandas descienden hacia el final del tubo, separándose más claramente y haciéndose más anchas. Un cromatograma completamente desarrollado presenta una serie de bandas definidas y bien separadas, cuya diferente anchura es proporcional a la cantidad que de cada substancia había en la mezcla inicial.

Las substancias ya separadas y purificadas pueden ser extraídas por uno de estos dos procedimientos: o bien prosiguiendo el lavado con disolvente, hasta que las sucesivas bandas salgan por el final de la columna, o bien empujando el cilindro del adsorbente para sacarlo del tubo, cortando seguidamente las bandas con una cuchilla y extrayendo la substancia de cada trozo con un disolvente. Si se succiona el cromatograma para secarlo, es más fácil sacarlo del tubo. Algunos autores extraen el adsorbente del tubo separando las bandas una a una con una fina espátula.

Se han probado miles de adsorbentes y solventes distintos. La selección de la combinación más efectiva para cada propósito suele ser el resultado de repetidas pruebas. La siguiente lista de adsorbentes y solventes, con los cuales se pueden separar la mayoría de las mezclas que pueda preparar el aficionado, fué descrita por William T. Beaver, un estudiante de la Universidad de Princeton, y mereció un galardón de la Westinghouse Science Talent Search. Los adsorbentes se presentan por orden aproximado de actividad de mayor a menor; los solventes en el orden inverso:

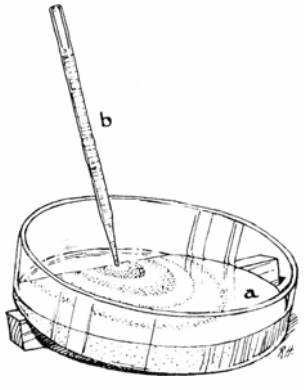
ADSORBENTES	SOLVENTES
1 – Alúmina activa	1 – Eter de petróleo
2 – Carbón vegetal	2 – Tetracloruro de carbono
3 – Magnesio	3 – Disulfuro de carbono
4 – Gel de sílice	4 – Eter
5 – Cal	5 – Acetona
6 – Carbonato magnésico	6 – Benceno
7 – Carbonato cálcico	7 – Alcohol metílico o etílico
8 – Carbonato sódico	8 – Agua
9 – Talco	9 – Acidos orgánicos
10 – Azúcar en polvo	10 – Soluciones acuosas de ácidos o bases.

A veces, en lugar de un solo solvente, es preferible utilizar varios, ya sea en combinación o uno tras otro. Por ejemplo, puede mezclarse una pequeña cantidad de benceno con un solvente de baja actividad, como el éter de petróleo, para acelerar el desarrollo de las bandas. Sin embargo, es necesario comprobar que el solvente seleccionado no sea tan activo

que lave inmediatamente las bandas de la columna. Una vez se han cortado en bloques las bandas del cilindro de adsorbente, se los puede tratar con un solvente de gran actividad para conseguir una extracción rápida y completa de las substancias principales. A este proceso se le denomina "elución" y al solvente o combinación de solventes utilizados "eluyentes". La mayoría de los adsorbentes y solventes más corrientes son baratos. Algunos se encuentran al alcance de todos, incluso en la propia casa. Beaver aconseja al principiante que adquiera los productos para cromatografía en un establecimiento de productos químicos. Los productos caseros estarán probablemente contaminados, y una pequeña cantidad de una materia extraña puede confundir los resultados. La cromatografía es una técnica extremadamente sensible.

Como dice Beaver, "el hecho de que existan pocas reglas establecidas sobre cromatografía es lo que la hace recomendable como afición. Ni siquiera el profesional más avanzado puede aconsejar un procedimiento preciso y rápido para fabricar y manejar una columna cromatográfica. El campo es tan nuevo que está abierto a todos los interesados. El aficionado tiene la gran oportunidad de hacer aportaciones importantes a la técnica".

El diámetro interno de la columna de vidrio puede medir desde unos milímetros hasta varios centímetros, dependiendo de la textura del adsorbente, la naturaleza de las substancias que van a ser adsorbidas, la cantidad de material disponible y otras consideraciones semejantes. La mayoría de investigadores prefiere usar columnas de uno o dos centímetros de diámetro interior. Normalmente las columnas son unas diez veces más largas que anchas. Para la separación de algunos isótopos, sin embargo, se han usado tubos delgados de varias decenas de metros de longitud. El final del tubo se tapa con una bola de algodón o de lana para proporcionar un soporte al adsorbente. Tubos de características similares pueden obtenerse en la mayoría de establecimientos de productos químicos, pero también pueden fabricarse fácilmente en casa con tubo de vidrio.

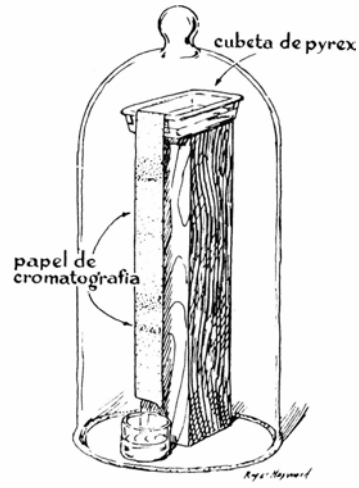


Método conveniente para escoger los solventes y adsorbentes.

La mayor dificultad práctica para el principiante es la de rellenar uniformemente la columna. Si el adsorbente no está uniformemente distribuido, lo más probable es que las bandas sean poco definidas y se solapen. Tswett iba introduciendo poco a poco el adsorbente en forma de polvo seco, presionándolo ligeramente, hasta lograr la longitud deseada. Experiencias posteriores han aconsejado modificar este procedimiento en varias formas. Después de haber colocado y apretado una de las capas de polvo seco en la columna, se puede disgregar ligeramente su superficie con una espátula, con lo que la siguiente se acoplará mejor, produciendo un resultado más uniforme. Un palo de madera normal y corriente, con un extremo plano y algo más estrecho que el diámetro interior del tubo, constituye un buen instrumento para taponar. Algunos adsorbentes se asientan satisfactoriamente en la columna si se hace vibrar ligeramente el tubo mientras se le llena lentamente.

La mayoría de los investigadores seleccionan los solventes y adsorbentes más apropiados para cada trabajo de acuerdo con técnicas conocidas y estandardizadas. Uno de los procedimientos más populares consiste en colocar una cucharadita del adsorbente en una cápsula de petri, inclinándola para que el contenido forme una especie de cuña sobre el fondo. La mezcla que se va a probar se disuelve en un disolvente débil y se colocan unas cuantas gotas de éste sobre el borde fino del adsorbente con una micropipeta. En estas condiciones se aplican varios solventes y combinaciones de ellos, comprobándose su mayor o menor actividad *(véase la ilustración de la primera columna).*

Los aficionados que quieran adentrarse en este campo recurrirán sin duda antes o después a la cromatografía sobre papel, técnica que facilita mucho las cosas. La "columna" es en este caso una tira u hoja de papel, que se introduce en el seno de una atmósfera saturada para evitar la evaporación. Tras humedecer el papel con disolvente, se aplica una gota de la solución que va a ser analizada en el borde superior de la hoja, o en una de sus esquinas. Seguidamente se dobla y



Cromatografía sobre papel (realizada en una cámara para evitar la evaporación de la muestra).

se introduce en una cubeta que contenga el disolvente que se va a utilizar para su desarrollo. El solvente desciende por capilaridad por la hoja así dispuesta, transportando las substancias a resolver, que son adsorbidas formando manchas a lo largo del papel. Estas manchas corresponden a las bandas de la columna convencional. Cuando el desarrollo hace que la mancha inferior se halle cerca del final de la hoja, puede sacarse ésta del solvente, girarla 90 grados e introducirla de nuevo en él. Cada mancha se convierte entonces en el punto de origen de un nuevo cromatograma. Si las fracciones desarrolladas están formadas por la mezcla de dos o más substancias, aparecerán ahora separadas a lo largo de la hoja. Lo que se obtiene entonces es una "cromatografía en dos dimensiones" *(véase la ilustración de esta tercera columna).*

Tswett comparaba las bandas que aparecían en su columna con los rayos de luz coloreada que emergen de un prisma formando un arco iris. La cromatografía en dos dimensiones refuerza la analogía al volver a someter cada mancha a un segundo análisis, incrementando así la resolución del método, de forma parecida a como ocurre en óptica, cuando los físicos hacen pasar un rayo coloreado que proviene de un prisma, a través de un segundo prisma. Muchos aficionados utilizan la técnica sobre papel como un método para determinar cualitativamente las fracciones de una mezcla, y luego usan la columna convencional para la determinación cuantitativa.

Tal como predijo Tswett, la técnica cromatográfica permite separar tanto las substancias coloreadas como las no coloreadas. Ultimamente se está trabajan-

do mucho en cromatografía de substancias incoloras. Se han desarrollado gran número de técnicas para visualizarlas. Por ejemplo, la presencia de aminoácidos se detecta pulverizando ninhidrina sobre el extruido de adsorbente o sobre el papel de cromatografía, con lo que estas substancias, normalmente incoloras, adquieren un color rojo suave. Otras substancias emiten fluorescencia a la luz ultravioleta. Si se coloca una gota de tinta azul-negra corriente en el extremo de un papel de cromatografía y se desarrolla con alcohol, se forman a lo largo del papel una serie de bandas azuladas que representan los distintos compuestos de hierro y los diferentes colorantes de la tinta. Pero, bajo una lámpara de luz ultravioleta, el papel seco muestra muchas otras bandas, de colores rojos, anaranjados y verdes. Por medio de un segundo cromatograma, en el que se utiliza como control una substancia conocida, puede identificarse otra desconocida comparando la posición de las respectivas bandas sobre los cromatogramas. También pueden detectarse fracciones incoloras sobre una columna cromatográfica por la acción diferencial que estas substancias ejercen sobre la luz transmitida a través de la columna o por su polarización. Recientemente se han marcado substancias con isótopos radiactivos, que luego se detectan por procesos fotográficos, pero estas técnicas suelen estar lejos del alcance del aficionado medio.

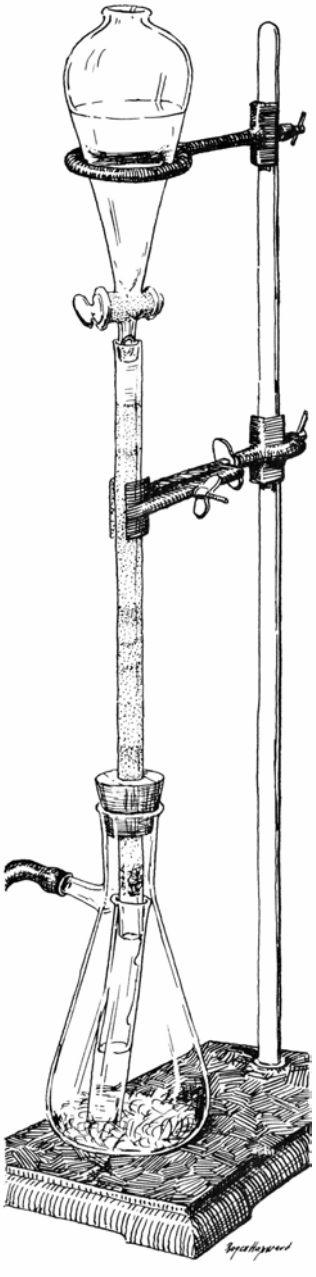
La extracción de las clorofilas, carotenos y xantofilas de hojas de espinaca puede muy bien servir como introducción a la técnica cromatográfica. El primer experimento que vamos a describir, sugerido por Beaver, deberá realizarse en una habitación bien ventilada, ya que los disolventes son muy volátiles e inflamables. Además, los vapores de uno de ellos, el alcohol de madera, son venenosos.

En columnas fabricadas de tubo de vidrio de unos 10 milímetros de diámetro interior y unos 30 centímetros de longitud, con uno de sus extremos pulido al fuego y el otro ligeramente acampanado, para facilitar el llenado, se empaqueta el adsorbente (alúmina de la casa Merck, estandarelizada de acuerdo con Brockmann, de 80 a 200 de poro). El empaquetamiento se realiza poco a poco y agitando simultáneamente el tubo. La succión reduce el tiempo de desarrollo. El dibujo de Roger Hayward *(véase la ilustración de la izquierda),* muestra cómo se ha de disponer la columna para utilizarla con un frasco de vacío. En la figura siguiente se presenta otra alternativa de alimentación sin necesidad de vacío.

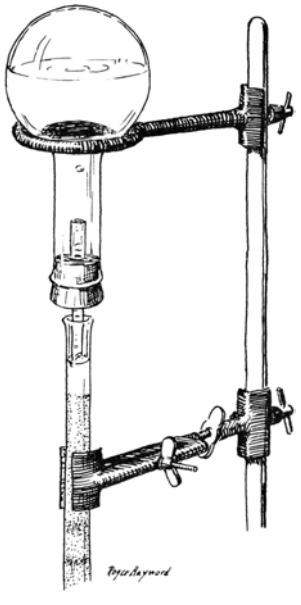
Se maceran diez gramos de hojas de espinacas secas en 100 mililitros de alcohol de madera durante 24 horas. Seguidamente se filtra el material y el residuo se lava con 50 mililitros más de alcohol de madera. Este extracto se agita con 50 mililitros de éter de petróleo; se añaden 100 mililitros de agua y la solución resultante se coloca en un embudo de decantación. Cuando se han separado las fases, se descarta la inferior (de alcohol-agua) y se filtra la superior (éter de petróleo), que es la que contiene el extracto.

Se coloca la mitad aproximadamente de este extracto en la columna de alúmina y se desarrolla con benceno. La primera fracción que atraviesa la columna es una banda muy extrecha amarillo-naranja de caroteno. A ésta le siguen algunas bandas más anchas rosa-amarillentas, que son de xantofilas. Estos pigmentos le son familiares a todo el mundo, ya que dan el color de otoño a los bosques una vez que el frío ha destruido la clorofila. Pueden recogerse las distintas fracciones de estos pigmentos a medida que salen por el final de la columna y evaporarlas para concentrarlos. Los dos grupos, carotenos y xantofilas, pueden resolverse en sus componentes volviéndolos a disolver en unos mililitros de éter de petróleo, haciéndolos pasar por columnas nuevas y desarrollándolos con éter de petróleo-benceno o, si se necesita mayor actividad del eluyente, con benceno puro.

Las clorofilas forman una banda verde oscura, que también puede extraerse de la columna. Los pigmentos se lavan en 5 mililitros de alcohol de madera y se filtra la solución. Este filtrado se coloca en un embudo de decantación con 5 mililitros de éter de petróleo y se añaden 5 mililitros de agua. El éter de petróleo extrae las clorofilas y el agua forma con el alcohol otra fase que puede ser decantada. El extracto de éter de petróleo se lava varias veces con agua por este mismo procedimiento y se coloca luego en una columna empaquetada con azúcar en polvo (sacarosa) disuelta en éter de petróleo hasta formar una papilla. La columna asi preparada se desarrolla con éter de petróleo. Las clorofilas se separan en dos componentes: una banda amarillo-verde oscura de beta-clorofila,



Columna de cromatografía alimentada por gravedad.



Columna de cromatografía alimentada mediante el vacío.

que se sitúa en la parte superior de la columna, y otra verde-azulada de alfa-clorofila, colocada mucho más abajo.

Debido al decisivo papel que juega en la fotosíntesis, la gente piensa en la clorofila como el maravilloso pigmento de las plantas. Pero muchos aficionados a la cromatografía encuentran en los carotenos un interés igual o mayor. A diferencia de las clorofilas, que actúan como catalizadores, los carotenos desempeñan un papel químico directo tanto en los animales como en las plantas. Al parecer son esenciales para la fabricación de la molécula de la vitamina A, y tienen un papel importante en los mecanismos de la visión y en los sexuales. Como su nombre indica, pueden extraerse de la zanahoria *(Daucus carota)*.

Para extraer carotenos, se trituran unos 5 gramos de raíces de zanahoria secas en un mortero. Se añaden 50 mililitros de una mezcla de alcohol de madera y éter de petróleo a partes iguales. Se agita fuertemente la mezcla, se añaden 5 mililitros de agua y se coloca en un embudo de decantación. Los carotenos más los ésteres de xantofilas se concentran en la fase de éter de petróleo que se forma en la parte superior del embudo. Se separa esta fase y se concentra evaporando algo de líquido, dejando unos 20 mililitros. Seguidamente se añaden 3 mililitros de hidróxido sódico disuelto al 5 por ciento en alcohol de madera. Así se saponifican los ésteres de las xantofilas, con lo que pueden extraerse. Para ello se lava la mezcla varias veces con alcohol de madera disuelto en agua al 85 por ciento. Para eliminar los restos del alcohol, se lava luego varias veces con agua. Se separa el éter de petróleo del agua y se filtra. La solución amarillo-naranja que se obtiene está formada por el complejo de carotenos de las raíces iniciales disuelto en éter. Para separarlos, se coloca la mitad aproximadamente de la solución obtenida en una columna de alúmina y se desarrolla ésta con una mezcla de benceno y éter de petróleo en la relación de 1 a 3. Se obtendrán tres bandas bien definidas, que contienen, de arriba abajo, gamma-caroteno, beta-caroteno y alfa-caroteno. Se puede recuperar cada uno de los pigmentos lavándolos sucesivamente de la columna o extrayéndolos con alcohol de madera de las bandas separadas del adsorbente.

La cromatografía es un método de separación mucho más sutil que las técnicas tradicionales de destilación, precipitación con reactivos y cristalización. Es también un método de una simplicidad encantadora.

Taller y laboratorio

Cómo cultivar bacterias inocuas y ensayar antibióticos contra ellas

Una serie de experiencias sencillas pueden demostrar cómo algunas bacterias se afectan por agentes bacteriostáticos, entre ellos, algunos fármacos que retardan el crecimiento de bacterias previamente seleccionadas. Para controlar estas sustancias, las bacterias deben cultivarse en un medio apropiado que facilite su crecimiento, exponerlas a la acción del bacteriostático y medir los resultados obtenidos. Las bacterias, como otros seres vivos, tienen preferencias respecto a sus alimentos, temperatura y humedad. De hecho, no se ha conseguido un medio de cultivo universal que permita el mismo desarrollo para todas las bacterias. Los medios se preparan de acuerdo con las exigencias nutritivas de las bacterias estudiadas. Sin embargo, el caldo de carne, convenientemente tratado y refinado, es un medio apto para el desarrollo de millares de microorganismos bacterianos. Además, puede utilizarse como medio sólido añadiendo la proporción adecuada de agar (15 g/litro)

Un aspecto esencial para realizar con acierto estas experiencias consiste en la eliminación de microorganismos intrusos. En este sentido, sólo interesa controlar las características de una especie bacteriana. La contaminación por otros microorganismos se evitará mediante la esterilización del medio de cultivo y utillaje empleado, manteniendo de un modo irreprochable durante la experimentación las condiciones de asepsia.

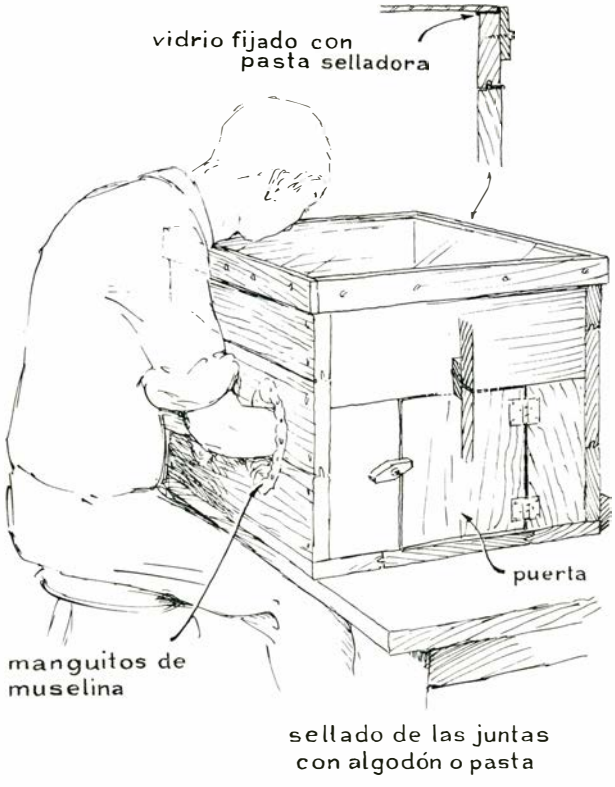
Preparación de la experiencia

Estas condiciones podrán mantenerse si el interesado está provisto de una cámara de siembras estéril, en la que se verifiquen todas las operaciones esenciales de la experiencia. Esta cámara o vitrina de siembras puede construirse con un cajón de madera que tenga 60 cm de altura, 60 cm de anchura y un metro de longitud. Como se muestra en la figura inferior de esta misma página, está provista de una cubierta de vidrio, una pequeña puerta y un par de orificios practicados en el lado mayor, adecuados para introducir manos y antebrazos. Las grietas deben eliminarse con algodón o materiales selladores. Para mayor seguridad, alrededor de los orificios pueden colocarse un par de manguitos, que evitarán en buena parte la penetración del aire desde el exterior. El interior de la cámara contendrá, entre otros objetos, un mechero de alcohol y un pequeño atomizador conteniendo una solución esterilizante tipo Lysol o Armil.

El material de vidrio imprescindible constará de unas dos docenas de placas de Petri completas, con las dimensiones convencionales para trabajos de microbiología, de 10 cm de diámetro. El experimentador necesitará asimismo tres matraces Erlenmeyer de un litro de capacidad y seis de 250 ml, una docena de tubos de ensayo de 20 ml de capacidad y la correspondiente gradilla para su colocación, una docena de pipetas graduadas de 1 ml y una perilla de goma apta para su llenado, un rotulador para vidrio, pinzas, varilla de vidrio y un asa de siembra para bacteriología construida por alambre de ferroníquel o platino de unos 5 cm de longitud, convenientemente fijada a un mango que aísle al manipulador del calor que emite el asa al ponerse al rojo en el momento de esterilizarse en los trasiegos de bacterias. Este utillaje debe situarse en una zona próxima a la vitrina o cajón de siembras.

Todos los materiales serán esterilizados. Las placas de Petri y las pipetas se envuelven cuidadosamente, en lotes de seis, en papel poco satinado tipo kraft. Los tapones de los tubos de ensayo y matraces Erlenmeyer se confeccionan con algodón hidrófilo. Los tubos de ensayo pueden envolverse por docenas en papel. Este material de vidrio se puede esterilizar a calor seco, colocándolo en una estufa a 100º C durante dos horas. Ningún envoltorio debe abrirse hasta el momento de la experiencia.

Respecto a los medios de cultivo, pueden adquirirse deshidratados, a través de establecimientos especializados, de las



Modelo de cámara de siembras estéril cuya construcción es, además, relativamente sencilla.

marcas más acreditadas, como BBL, Difco, Merck y Oxoid. Sin embargo, uno de los objetivos principales de la experiencia lo constituye el propio aprendizaje del experimentador en las técnicas básicas del cultivo de bacterias, entre ellas, la preparación del medio de cultivo.

Un procedimiento sencillo para la obtención de caldo de carne consiste en tomar una muestra de unos 400 g de carne troceada, tipo hamburguesa y mezclarla con un litro de agua destilada. Se agita durante unos minutos y se mantiene en el refrigerador a una temperatura de 4º C aproximadamente, durante 10 horas. Posteriormente se retira la capa de grasa sobrenadante y se filtra el líquido residual a través de una gasa estéril con varios dobleces. Se ajusta el volumen hasta un litro con agua destilada y se añaden 5 g de peptona y 5 g de sal común, agitando hasta su disolución. Se separan 50 ml del caldo para un segundo matraz. Finalmente añadir 15 g de agar a los 950 ml restantes.

Las bacterias, como otros microorganismos, son sensibles al equilibrio ácido-base del medio en el que se desarrollan. Las bacterias adecuadas para la experiencia crecen en medios neutros. Sin embargo, los dos medios preparados tendrán una ligera acidez. Para conseguir su neutralidad, debe añadirse la cantidad suficiente de una solución de hidróxido sódico, que se prepara con 10 g de este producto en un litro de agua destilada. Con la ayuda de un papel indicador de pH, se ajustarán los medios a p H neutro, añadiendo una o dos gotas de la solución de sosa.

Los matraces con los medios se calientan a 100º C durante media hora. Con esta temperatura precipitarán las proteínas del medio. El precipitado se separa por filtración del medio caliente a través de papel de filtro tipo jarabe. El medio transparente se lleva de nuevo a su volumen inicial por adición de la cantidad suficiente de agua destilada.

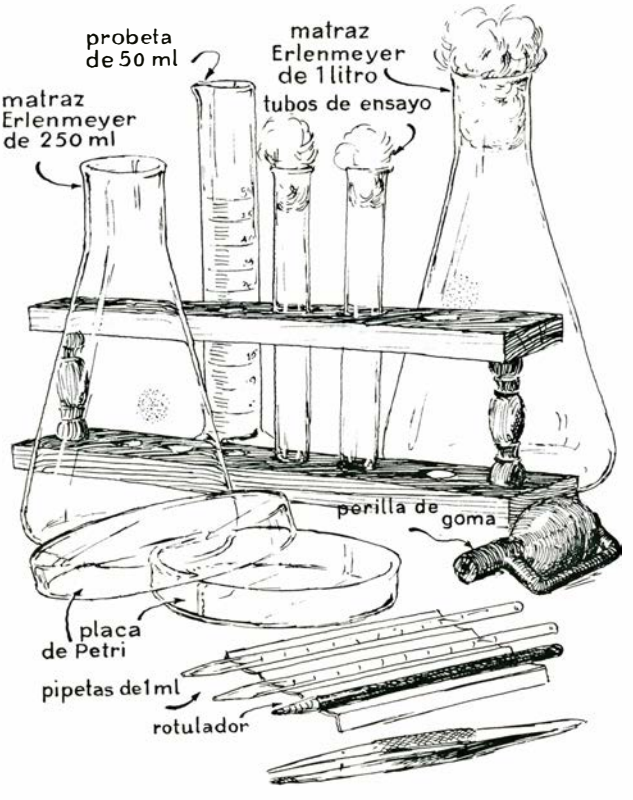
El medio que contiene el agar fundido se reparte, distribuyendo 100 ml del mismo en seis matraces Erlenmeyer que se cubren con tapones de algodón. Por otra parte, el caldo de carne se distribuye en los tubos de ensayo, a razón de 5 ml de medio por tubo. Estos tubos se taparán igualmente con algodón.

Para conseguir la esterilización de los medios, los matraces se colocarán en baño-maría durante media hora, tres días consecutivos (agua hirviendo). Otra alternativa consiste en realizar la esterilización con la ayuda de una olla a presión doméstica. La olla, con 4 cm de agua y el material que se desea esterilizar en su interior, se somete a un proceso de vaporización de 20 minutos de duración. El enfriamiento debe verificarse con lentitud. La aceleración del mismo con agua fría causará un descenso súbito de la presión interior, provocando la ebullición de los medios contenidos en los matraces y consiguiente proyección de los tapones.

Para estas experiencias deben utilizarse obviamente bacterias no patógenas. Cepas de *Staphylococcus epidermidis, Enterobacter aerogenes* o *Alcaligenes faecalis* constituyen algunos ejemplos. Pueden adquirirse a través del centro universitario más próximo dotado de un departamento de microbiología o solicitándolas a un costo relativamente bajo, a centros internacionales especializados, como American Type Culture Collection, 2112 M Street, Washington 6, D.C. Es lógico que el interesado en este campo dude sobre la necesidad de adquirir las cepas bacterianas precisas a través de los centros indicados cuando es un hecho conocido que las bacterias abundan en la atmósfera. Su crecimiento puede conseguirse por simple exposición al aire de una placa de Petri con medio sólido, abierta, incubándola luego durante 24 horas. Sin embargo, es interesante señalar que este procedimiento carece de sentido y puede ser peligroso. Carece de sentido porque el principiante no dispone de sistemas de identificación para los microorganismos que aísle. Es peligroso porque existe la posibilidad de cultivar microorganismos patógenos. Las cepas bacterianas recomendadas son inofensivas y tienen la ventaja de su disponibilidad. Por otra parte, al utilizar cepas conocidas se pueden comparar resultados. Estas bacterias se pueden mantener indefinidamente en caldo de carne, por resiembra diaria de una gota de cultivo viejo hasta un tubo con caldo fresco estéril. Si el cultivo se mantiene a 4º C la resiembra puede verificarse semanalmente.

Experiencia de bacteriostasis

Para llevar a cabo la experiencia de bacteriostasis, se introducen en la vitrina de siembras un tubo de medio frasco y estéril, un tubo con la cepa desarrollada durante 24 horas y el asa de siembra. La vitrina se esteriliza con el aerosol germicida, dejando sedimentar las microgotas del aerosol durante cinco minutos. Se enciende el mechero de alcohol y se calienta al rojo el asa de siembra. Los tu-



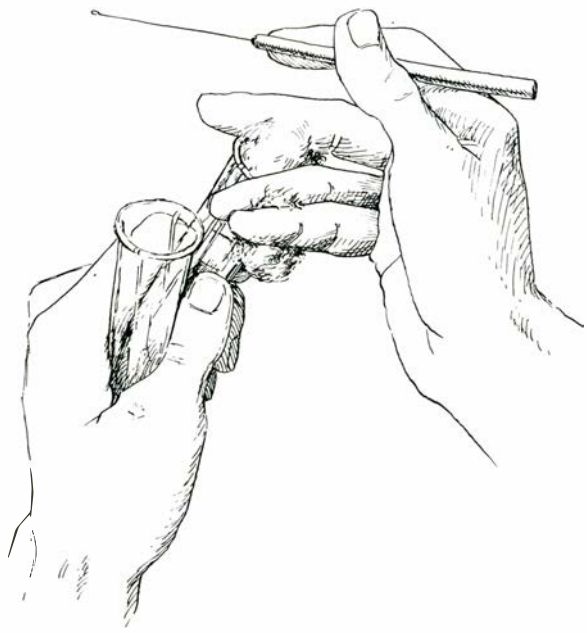
Utillaje, básico, de acuerdo con las exigencias, para efectuar los experimentos bacteriológicos.

bos se mantienen en la mano izquierda y el asa estéril en la derecha, como indica la figura de la derecha. Se retiran los tapones de los tubos manteniéndoles entre los dedos como señala la misma figura. Se flamean cuidadosamente los bordes de los tubos. El asa de siembra se sumerge durante un segundo en el tubo que contiene el crecimiento de la cepa bacteriana y se transfiere al medio estéril contenido en el segundo tubo por simple inmersión. Se colocan los dos tapones y el asa se esteriliza de nuevo al rojo. Para evitar contaminaciones y adquirir práctica, es conveniente ensayar estas operaciones varias veces con tubos vacíos.

El tubo recién sembrado se incuba durante dos horas a temperatura ambiente y luego se somete a 4º C. Al cabo de 24 horas, el tubo se agita frente a una luz. La presencia de turbidez y sedimento señala que la resiembra ha sido positiva. Si esto no sucediera, debe repetirse la operación. En ocasiones es conveniente aguardar otras 24 horas antes de eliminar el cultivo.

Los discos de antibióticos para ensayos de sensibilidad pueden obtenerse a través del distribuidor local de marcas como BBL, Difco, Merck, Oxoid y Pasteur. Cada fabricante especifica la concentración por disco. Algunos suministran los antibióticos a tres concentraciones distintas, baja, media y alta. Entre los antibióticos disponibles se encuentran tetraciclinas, bacitracina, cloranfenicol, estreptomicinas, eritromicina, neomicina, penicilinas, polimixina B y viomicina.

El ensayo de bacteriostasis consiste en la colocación de los discos de distintas concentraciones sobre placas que contienen medio sólido inoculado con la bacteria elegida. Un halo de inhibición del crecimiento de la bacteria alrededor del disco del antibiótico indica una sensibilidad positiva. Si se utiliza el sistema de tres concentraciones, la sensibilidad de un organismo frente a un antibiótico puede evaluarse de acuerdo a la tabla expuesta a continuación:



Esquema mostrando el manejo correcto del asa de siembras en la experiencia de bacteriostasis

La experiencia se inicia colocando el siguiente material en la vitrina de siembras: 1) un litro de agua corriente estéril, 2) dos paquetes de placas de Petri estériles, 3) una docena de pipetas de 1 ml estériles y la perilla de goma, 4) un baño de agua a 45º C en el cual se han colocado seis matraces Erlenmeyer con el medio de agar previamente fundido, 5) una gradilla con seis tubos, 6) un rotulador y 7) un recipiente con solución de Lysol o Armil para colocar las pipetas utilizadas.

El material de vidrio estéril se desempaqueta y se procede a la preparación del banco de diluciones. Para ello y con la ayuda de la perilla de goma se distribuyen 9 ml de agua estéril a cada uno de los seis tubos de ensayo necesarios para esta experiencia. Con la ayuda de la perilla se toma a continuación 1 ml del tubo que contiene el cultivo bacteriano y se transfiere al primero de los seis tubos. La pipeta empleada se sumerge en la solución germicida. El tubo se marca con la dilución 1/10 y se agita durante 30 segundos. Con una nueva pipeta estéril se toma 1 ml de dilución 1/10 y se transfiere al tubo que contiene 9 ml de agua corriente estéril, que se rotula con la marca 1/100. Esta operación se repite hasta alcanzar la dilución 1/1.000.000. En cada dilución se desecha la pipeta usada.

Una muestra del medio fundido y mantenido a 45º C de cada uno de los seis matraces se vierte por duplicado en placas de Petri. Estas muestras servirán como controles del medio contenido en los mismos. Posteriormente cada matraz se rotula con una de las seis diluciones indicadas en los tubos. Cada uno de ellos recibe como inóculo 1 ml de la dilución correspondiente. Se agitan por rotación suave, a efectos de homogeneizar el inóculo sembrado. El banco de diluciones contenido en los tubos se puede desechar.

Al terminar esta operación, se introducen en la vitrina de siembras doce placas de Petri estériles, unas pinzas y los viales que contienen los discos de antibióticos. Parte del contenido de cada matraz se utiliza para llenar dos placas de Petri, a razón de unos 20 ml por placa. Cada par de placas se rotula con la dilución que corresponde a cada matraz. Los discos de antibióticos se colocan a los 20 minutos del llenado de las placas sobre el medio ya solidificado, con la ayuda de las pinzas convenientemente flameadas. Los discos de baja concentración pueden colocarse en una placa, empleando la restante para los discos de concentración elevada. Si se emplean discos con tres concentraciones, se añadirán las placas necesarias. Entre los discos debe

SENSIBILIDAD	CONCENTRACION		
	BAJA	MEDIA	ALTA
MUY SENSIBLE	HALO	HALO	HALO
SENSIBLE	SIN HALO	HALO	HALO
LIGERAMENTE SENSIBLE	SIN HALO	SIN HALO	HALO
RESISTENTE	SIN HALO	SIN HALO	SIN HALO

Véase la sensibilidad de un organismo a tres concentraciones distintas del mismo antibiótico

mantenerse una distancia del orden de 4 cm. Un sistema que facilita la colocación de los discos puede consistir en el trazado con el rotulador de un radio sobre la base de la placa. El disco de tetraciclina se coloca sobre esta línea y los restantes por orden alfabético en el sentido de las agujas del reloj. Se cubren las placas y se incuban durante dos días a 27° C.

Las placas pueden incubarse utilizando como estufa la misma cabina de siembras, introduciendo una bombilla de 100 watios. El encendido de la misma se puede controlar con un termostato semejante a los empleados en acuarios para peces tropicales.

La actividad de los respectivos antibióticos podrá evaluarse por la observación del desarrollo bacteriano en las placas y la presencia de halos de inhibición de crecimiento alrededor de algunos discos. Los resultados pueden tabularse con un signo menos para indicar resistencia de la bacteria al antibiótico y con un signo positivo para señalar sensibilidad. Cualquier desarrollo microbiano en las placas utilizadas como control, indicaría una contaminación que invalidaría la experiencia. Al concluir las lecturas, las placas pueden esterilizarse por inmersión en un recipiente que contenga una solución de hipoclorito.

Tabulación del efecto de los antibióticos

Una interesante modificación del ensayo descrito permite al experimentador tabular el efecto de los antibióticos respecto al tiempo. Con ella se puede estudiar el intervalo existente entre la inoculación y la acción del antibiótico, verificando en algunos casos la pérdida de su efectividad. Para ello se requiere la construcción de un fotómetro relativamente sencillo, capaz de leer la transmisión relativa de luz a través de un tubo de ensayo. El crecimiento de las bacterias en medio líquido incrementa la turbidez y disminuye su transparencia. Por tanto, al medir la turbidez de un tubo con bacterias en crecimiento a través del fotómetro, medimos en cierto modo la población bacteriana. Básicamente, el fotómetro consiste en una lámpara emisora de luz, una lente que enfoca los rayos por un lado del tubo de ensayo, una fotocélula que recibe los rayos de luz transmitida por el otro lado del tubo y un microamperímetro para medir la intensidad de la corriente generada por la fotocélula. El diseño del aparato se indica en la figura de la derecha.

En este caso, las operaciones se llevan a cabo en tubos de medio líquido en lugar de agar. En condiciones de asepsia, se disuelve una gragea de antibiótico en 10 ml de agua corriente estéril. Las diluciones de esta solución se preparan como antes, es decir, seis diluciones que estén comprendidas entre 1/10 y 1/1.000.000. Es interesante señalar que en este caso se diluye el antibiótico en lugar del cultivo bacteriano. Se toma 1 ml de cada nivel de dilución y se lleva al respectivo tubo de ensayo que contiene 4 ml de caldo.

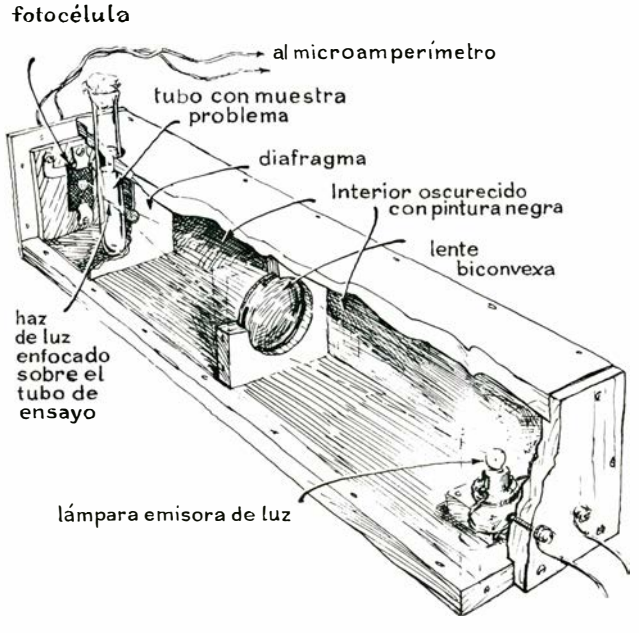
Los tubos que contienen la solución de caldo-antibiótico se inoculan con una gota de un cultivo bacteriano incubado con antelación durante 48 horas. Para esta operación se necesita una pipeta estéril graduada de 1 ml. Los tubos inoculados se incuban a 27° C. A intervalos iguales durante el período de incubación, por ejemplo, cada tres horas, los tubos se agitan cuidadosamente para homogeneizar su turbidez. Esta se mide con el fotómetro y puede representarse gráficamente en función del tiempo. Es conveniente comprobar antes de la experiencia la uniformidad en la transmisión de luz de caldo contenido en cada tubo. Los instrumentos ópticos utilizados por profesionales en esta clase de experiencias se ajustan a la ley de Beer, que establece la proporcionalidad entre la luz absorbida para una sustancia determinada en un solvente dado y la trayectoria óptica recorrida por la luz a través de la solución.

Los ensayos verificados por el método turbidimétrico tienen un gran valor práctico porque demuestran qué antibiótico puede emplearse con mayor efectividad respecto a bacterias de comportamiento desconocido.

Aislamiento de nuevas cepas bacterianas

Durante el curso de las experiencias verificadas con el método de la placa, puede observarse ocasionalmente alguna colonia bacteriana aislada en el halo de inhibición. Probablemente se trata de una bacteria contaminante. Existe, sin embargo, la posibilidad de que sea una cepa mutante de la ordinariamente empleada, puesta en evidencia por el efecto del antibiótico sobre el resto de la población. Se han desarrollado métodos que determinan si la bacteria aislada es una contaminante del medio o una mutante del cultivo original.

Es un hecho conocido que las radiaciones de longitud de onda corta aumentan la velocidad de mutación de los microorganismos. Es posible obtener cepas bacterianas con nuevas características por exposición breve de sus cultivos a radiaciones ultravioleta. Sin embargo, estas experiencias deben realizarse únicamente por microbiólogos profesionales.



Fotómetro adecuado para medir la densidad de un cultivo bacteriano en los referidos experimentos

Taller y laboratorio

Unos dispositivos mecánicos que dibujan armonigramas

C. L. Stong

Las figuras ornamentales incluidas en este artículo pueden interpretarse de muchas maneras: como música representada, como el flujo de los electrones en un aparato de radio, o, simplemente, como figuras bonitas. En todos los casos se trata de la superposición de dos o más movimientos armónicos, en todo semejantes a los que muestra un péndulo al oscilar. Debido a ello, tales figuras se llaman *armonigramas*. Atrajeron el interés general en 1857 cuando el físico francés Jules Antoine Lissajous presentó su armonígrafo, aparato destinado a crear armonigramas.

En el aparato de Lissajous se empleaba la luz para trazar las curvas. Para ello Lisajous pegó pequeños espejos a un par de diapasones, que vibraban con frecuencias distintas en planos separados. Un rayo de luz reflejado por los dos espejos incidía en una pantalla próxima, en donde las vibraciones generaban una serie de curvas que se entrelazaban y cambiaban lentamente. La demostración fascinó a los auditorios, de modo que el diseño y manejo de armonígrafos se convirtió en un pasatiempo muy generalizado.

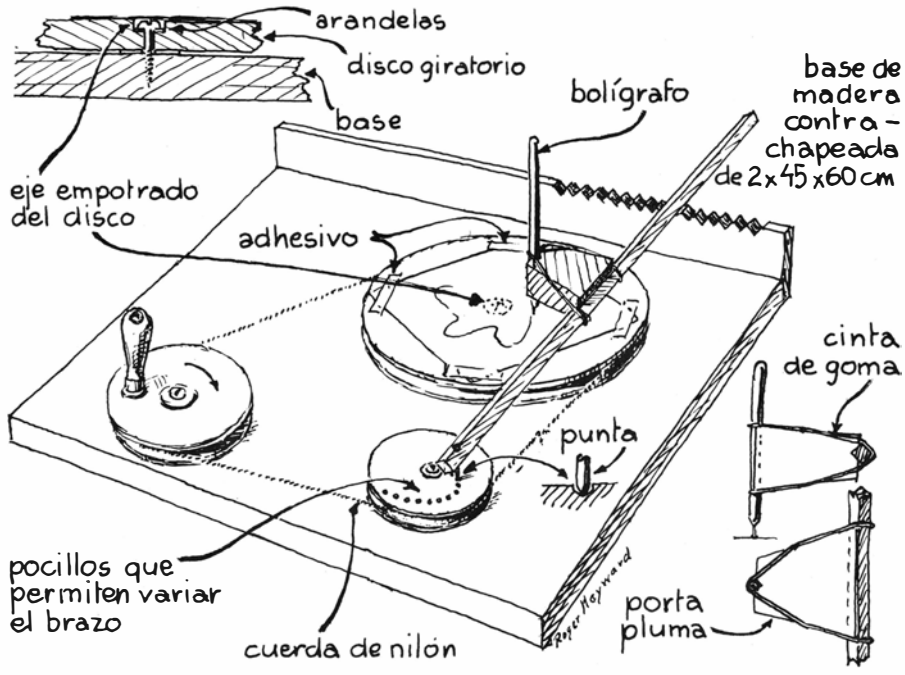
El pasatiempo continúa teniendo adeptos. Hace poco por ejemplo, Katherine O. Reed de Concordia, Massachusetts, Estados Unidos, junto con su padre, Thomas B. Reed, químico del laboratorio Lincoln del Instituto de Tecnología de Massachusetts, construyeron un armonígrafo para un concurso científico de su escuela superior. Cuando éste hubo terminado, el padre se encontró inmerso en el centenario tema. Como consecuencia de ello, los Reed han diseñado una sucesión de armonígrafos para crear figuras cada vez más atractivas. Su máquina más perfeccionada es complicada y pesa más de 30 kilogramos.

Así es como explican de qué se trata. Los armonigramas pueden producirse por diversos dispositivos que tienen ciertos elementos en común. Uno de los esenciales es un inscriptor de algún tipo, que puede consistir en pluma y papel, en un rayo de luz que actúa sobre papel fotográfico, en un estilete que graba sobre un vidrio ahumado, en una chispa eléctrica que oscurece un papel conductor, o en un rayo de electrones cuyos puntos de impacto sobre una pantalla son puestos de manifiesto por una sustancia fosforescente. La "pluma", cualquiera que sea, debe ser movida por un mecanismo oscilante.

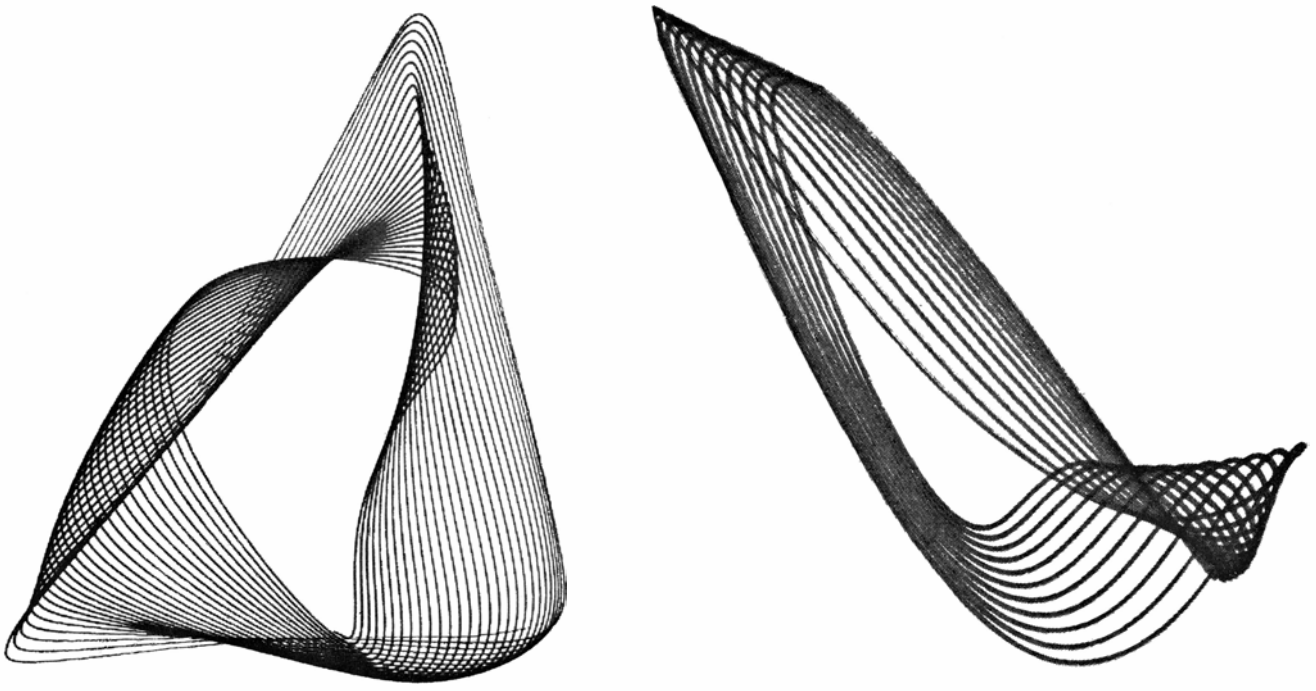
En general, los armonígrafos mecánicos usan como osciladores o bien péndulos o bien manivelas. El movimiento de una manivela horizontal, cuando se mira lateralmente, tiene el mismo aspecto que el de un péndulo visto desde abajo. Ambos son ejemplos de movimiento armónico. Las máquinas a base de péndulos son más fáciles de construir y tienen la ventaja adicional de producir figuras que van disminuyendo en tamaño a medida que la amplitud va decreciendo.

Una versión simple de máquina de péndulo consiste en una linterna suspendida de una cuerda o de un delgado alambre. El bulbo de la lámpara está tapado y la luz sólo puede salir a través de un orificio del tamaño de la punta de un alfiler. Si se hace oscilar la lámpara de modo elíptico y se fotografía desde abajo con un cierto tiempo de exposición se obtiene como imagen sobre la placa una elipse espiralada. El eje de la elipse gira a causa de las inevitables irregularidades de la suspensión.

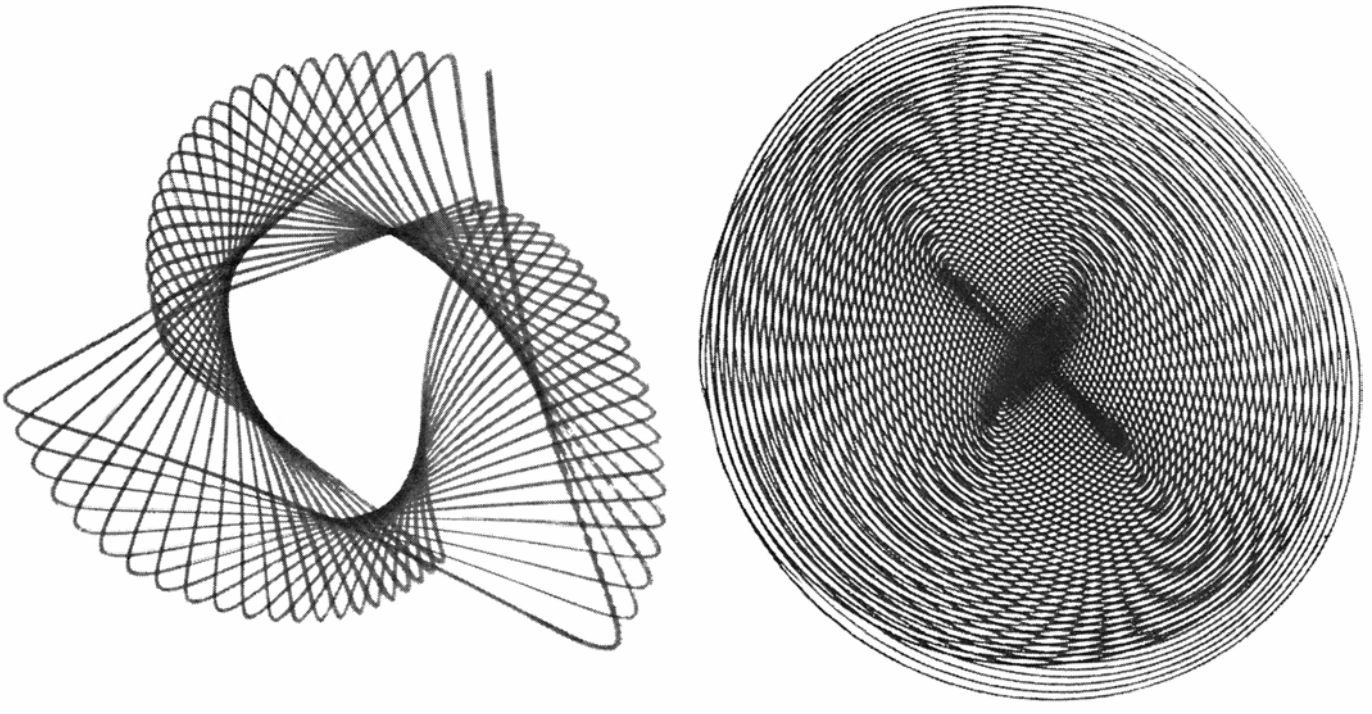
Un péndulo algo más complicado, que genera figuras semejantes a las de Lissajous, se debe al físico británico Hugh Blackburn. Consiste en un peso que cuelga de dos delgados alambres de igual longitud sujetos a puntos algo separados de la barra de suspensión. Mediante una anilla, que puede deslizarse, los alambres se mantienen juntos en un punto convenientemente elegido. De este modo, los dos alambres forman en parte un cable único cuya longitud puede variarse sin más que correr el anillo. En los museos científicos se exhiben con frecuencia péndulos de este tipo que tienen como pesa un embudo de orificio pequeño por el que cae arena fina que deja un registro del movimien-



Un armonígrafo de manivela



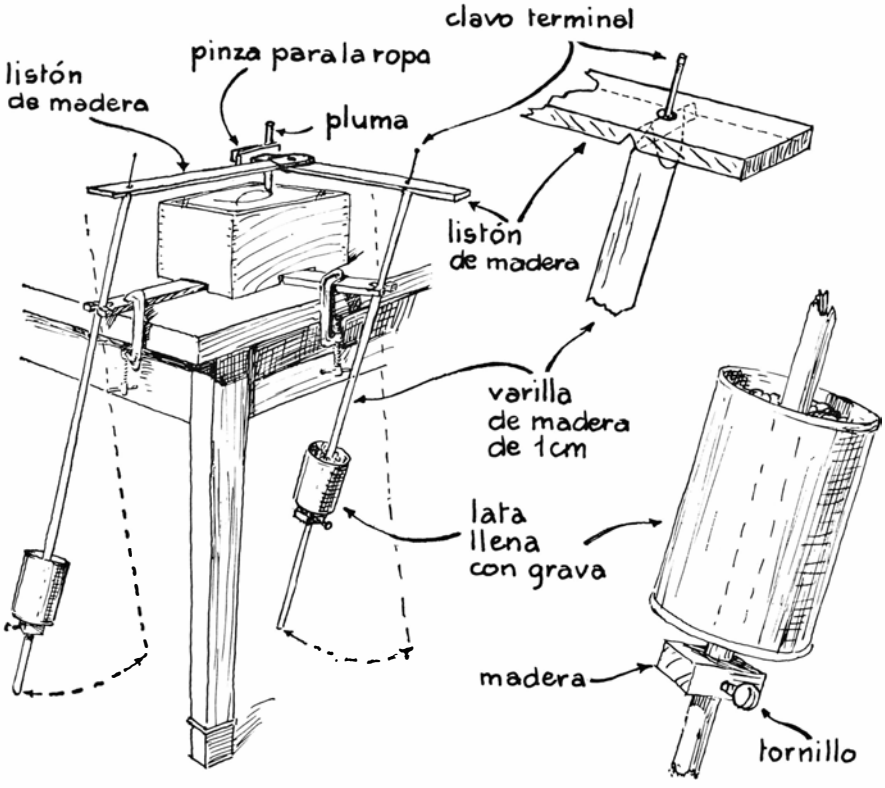
Figuras obtenidas con un armonígrafo de doble péndulo elíptico



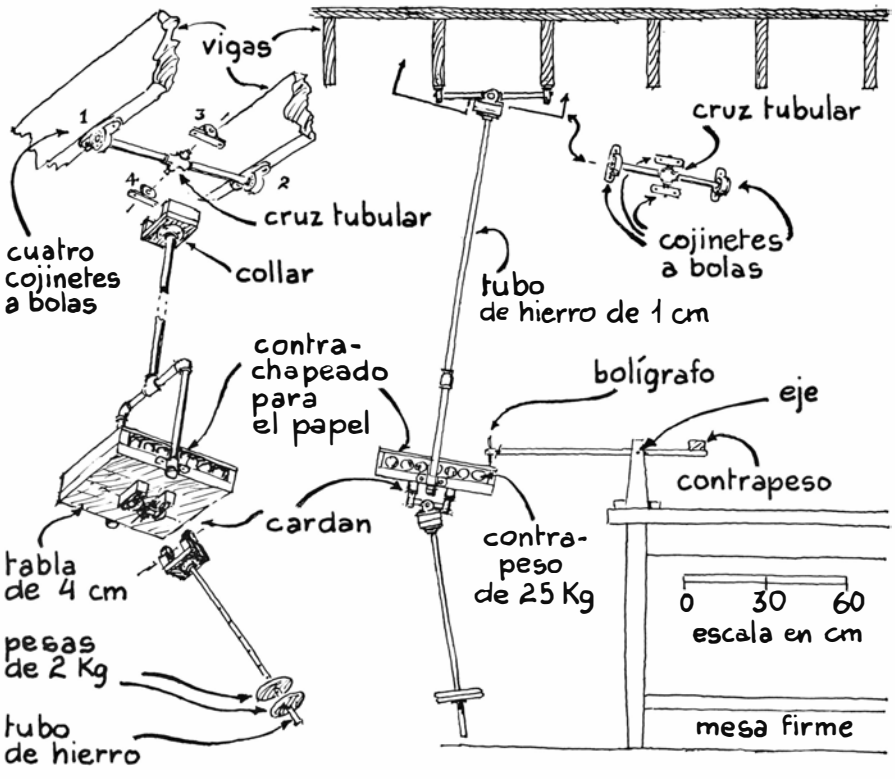
Figuras obtenidas con un solo péndulo: a la izquierda, análogas a las anteriores y, a la derecha, con aspecto de moaré

to, en la superficie horizontal situada debajo.

Con madera pueden construirse fácilmente máquinas simples del tipo de manivela. Una de ellas, construida por Tom Barnard de Tucson, Arizona, tiene como base una tabla de madera de 45 x 60 cm de unos 2 cm de grueso. La tabla sostiene tres poleas conectadas por una sola correa *(véase la ilustración de la pág. 106)*. La cara superior de la polea mayor, que tiene unos 25 cm de diámetro, sirve de apoyo a una hoja de papel que gira sujeta a ella. Un brazo ajustable lleva la pluma y es accionado por otra polea más pequeña. La máquina proporciona sus dibujos más interesantes cuando el diámetro de esta polea no es submúltiplo del diámetro de la polea mayor. El extremo de este brazo va conectado a uno de los agujeros dispuestos con radios variables en la polea tractora. Tal disposición permite al operador regular a voluntad la acción del brazo. Su otro extremo cabalga sobre una de las muescas existentes en el borde del otro lado de la tabla soporte; la muesca empleada determina el radio del armonigrama. Un bolígrafo corriente está sujeto a la varilla mediante un puente metálico y



Armonígrafo de doble péndulo



Aparato con doble péndulo elíptico

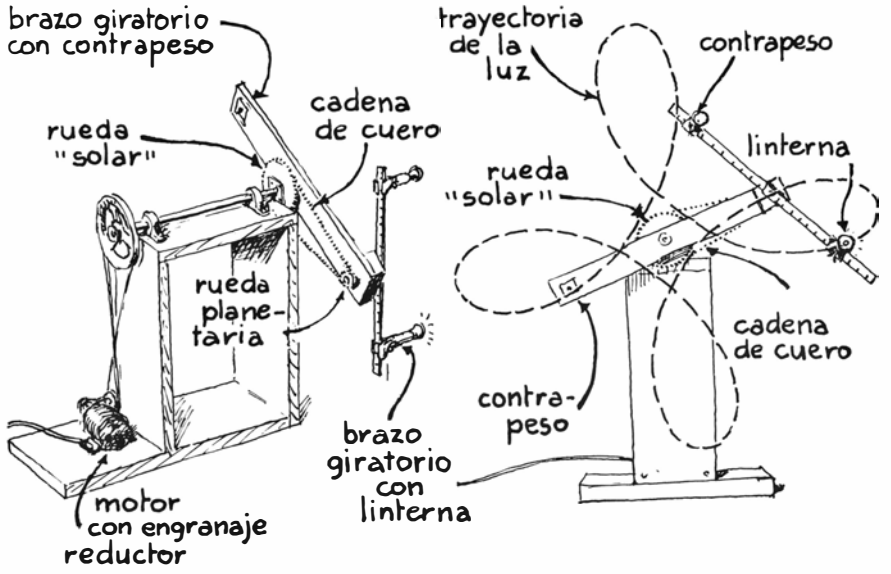
una gomita. El dispositivo es accionado a mano mediante una tercera polea.

Una máquina algo más complicada, pero menos portátil, es el armonígrafo de péndulos gemelos *(véase la ilustración superior izq.)*. Estos, mediante una articulación, van unidos a la pluma de modo independiente y oscilan en planos perpendiculares entre sí. Una pequeña mesa sostiene el papel sobre el que se mueve la pluma. El período de cada péndulo puede ajustarse subiendo o bajando la pesa correspondiente. Hemos fabricado nuestros péndulos con varillas de madera de algo más de 1 cm de diámetro y de cerca de un metro de longitud. Las varillas pivotan sobre cuchillas situadas unos 25 cm por debajo del extremo superior. Las pesas de los péndulos consisten en simples latas llenas de grava que pesan unos 3 kilogramos.

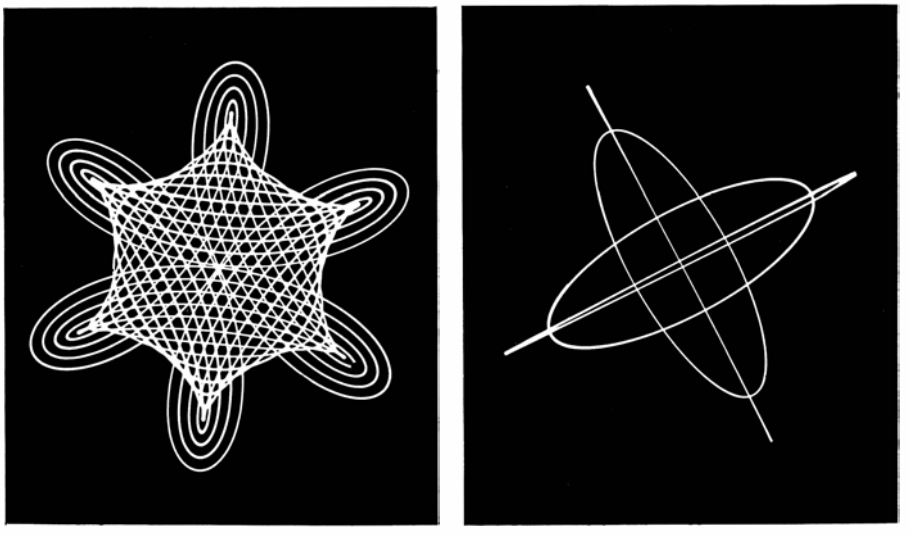
Hemos observado que el bolígrafo escribe mejor si se lastra con 50 g de arandelas de hierro. El dispositivo proporciona figuras con líneas bastante espaciadas pues el bolígrafo frena rápidamente al conjunto. Las curvas resultan más juntas si el bolígrafo se sustituye por una pluma tubular de dibujo (Leroy). La pluma ejerce una presión de sólo unos pocos gramos. Se aumenta su capacidad de tinta colocando en su parte superior un tubito de algo más de un centímetro de longitud y de unos 5 mm de diámetro. Empleamos las plumillas de los tamaños 0 y 1.

Nuestra máquina más moderna es una versión, muy elegante por su simplicidad, del péndulo elíptico doble descrito por primera vez en 1907 por experimentadores británicos. Consiste en una pequeña plataforma de madera lastrada con unos 22 kg de hierro *(véase la ilustración inferior izq.)*. La plataforma está suspendida del techo mediante un yugo y un largo tubo de hierro con una cardan o cojinetes de bolas. Las curvas se dibujan sobre una hoja de papel, fijo sobre la plataforma. La pluma está unida a uno de los extremos de un brazo de palanca equilibrado. El dispositivo descrito sólo genera circunferencias, elipses y líneas rectas. El interés reside en que pueden superponerse dibujos idénticos, algo corridos uno respecto del otro, de modo que aparecen figuras con aspecto de moaré.

Las posibilidades de la máquina pueden ser potenciadas del modo más sorprendente suspendiendo por debajo de la plataforma un segundo péndulo menos pesado mediante una nueva cardan. Cuando el péndulo inferior oscila con arreglo a su propio período natural per-



Un armonígrafo productor de hipocicloides



Figuras obtenidas con un armonígrafo generador de hipocicloides

turba el movimiento de la plataforma oscilante de un modo muy variado. Las curvas más sugestivas se producen cuando la frecuencia del péndulo superior está en una relación sencilla con la del inferior, tal como 3:2 o bien 2:1. Los factores ajustables que determinan una figura son: las dos amplitudes del péndulo superior, el desfase entre ellas, el desfase entre los dos péndulos, la fase y amplitudes del péndulo inferior y la razón de frecuencias entre los dos péndulos. Apenas hemos empezado a estudiar la gran variedad de figuras que pueden ser producidas con la máquina del doble péndulo elíptico.

Son igualmente interesantes las máquinas que funcionan a base de manivelas, especialmente las que generan hipocicloides y epicicloides. Una hipocicloide es la curva descrita por un punto de una circunferencia que rueda por la parte interior de otra circunferencia; en la epicicloide, la rodadura se realiza por la parte exterior de la otra circunferencia. Las máquinas de este tipo pueden ser ajustadas para generar toda una familia de curvas que incluye la cardiode, el caracol de Pascal, la deltoide, la astroide, el trébol, el trébol de cuatro hojas, la elipse, la circunferencia e incluso la línea recta.

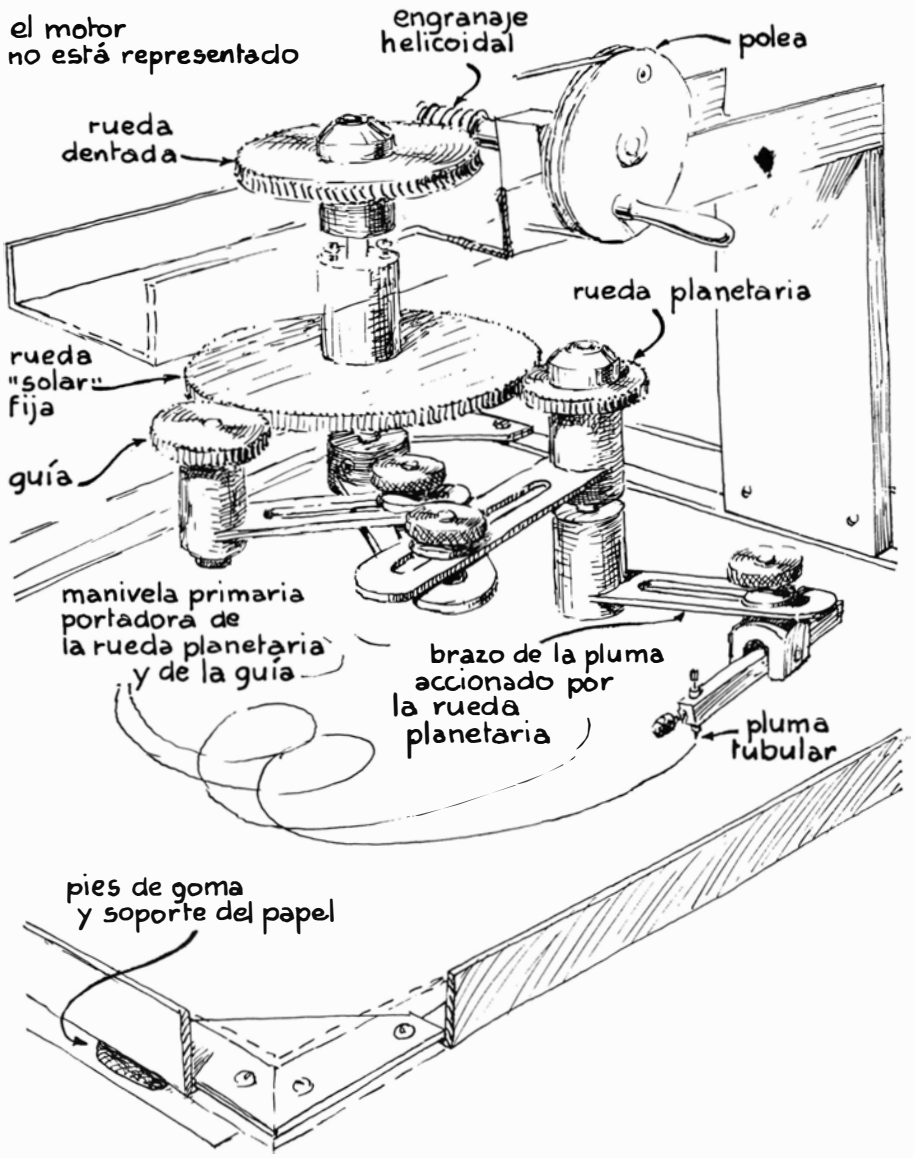
Una máquina sencilla a base de manivela ha sido construida por Everett Clement de Peterborough, New Hampshire. E. Clement realizó el trabajo para estudiar las curvas que aparecen en la pantalla de un osciloscopio electrónico cuando

se conectan a sus terminales dos oscilaciones eléctricas de forma y fase adecuadas. Su dispositivo consiste en un brazo giratorio accionado por un motor eléctrico. En un extremo lleva un segundo brazo que gira a su vez mediante una rueda dentada planetaria y una cadena que engrana con una rueda dentada del eje fijo ("Sol").

En un extremo de este segundo brazo se encuentra una pequeña linterna, cuya luz es fotografiada con una exposición larga en una habitación oscura. El primer brazo describe una circunferencia, mientras la linterna, que marca un punto de la segunda circunferencia, genera hipocicloides. El radio de la figura puede ajustarse alterando la posición de la linterna en su brazo soporte.

Una máquina más compleja y de mayores posibilidades ha sido fabricada por H. A. Cata, de Ginebra, Suiza. Su autor le ha dado el nombre de ciclógrafo *(véase la ilustración de la pág. 110)*. Puede generar tanto hipocicloides como epicicloides. Además de las figuras que pueden obtenerse con la máquina de Clement, el ciclógrafo demuestra que la cardiode, el caracol de Pascal y la nefroide son simplemente casos especiales de la epicicloide. Sin embargo, las espirales, las cúbicas, las cuárticas y demás curvas de orden superior caen fuera de sus posibilidades actuales.

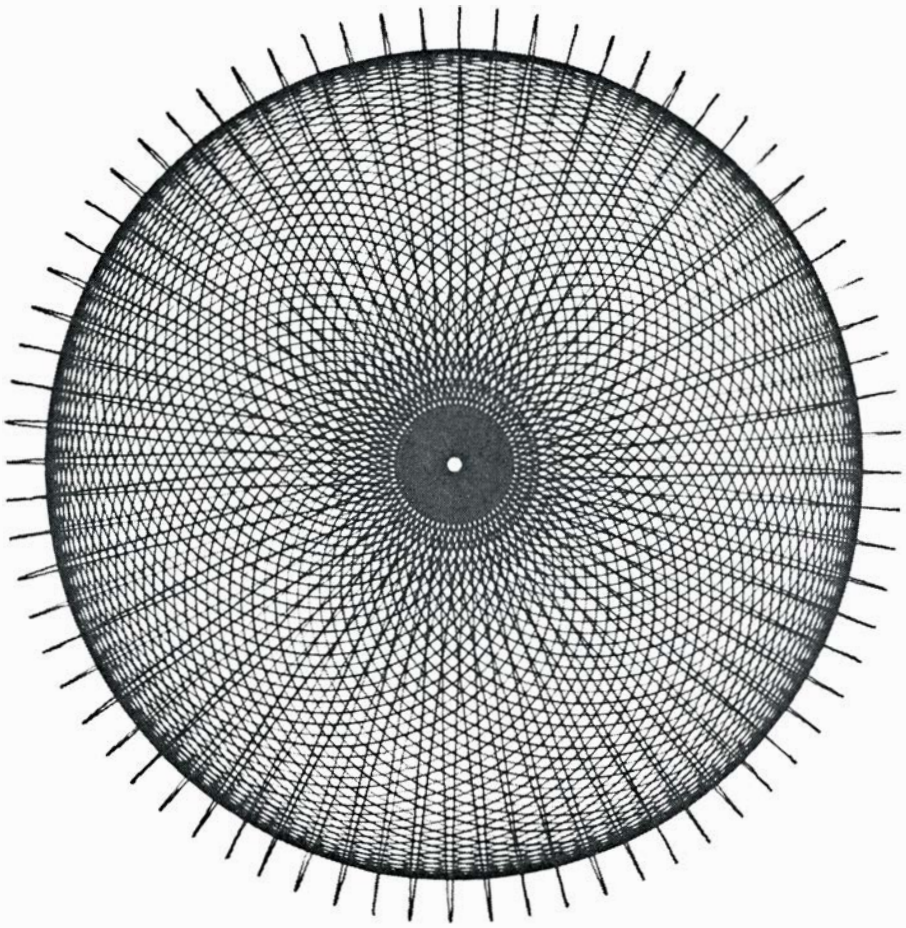
A excepción de las máquinas con un sólo péndulo, las demás pueden emplearse para producir armonigramas estereoscópicos, es decir, curvas que parecen tridimensionales al observarlas mediante un estereoscopio o con la ayuda de un prisma. Con alguna práctica, hay quienes son capaces de ver las figuras en tres dimensiones sin más que cruzar los ojos de tal modo que el ojo derecho vea sólo la figura izquierda y el izquierdo la derecha. Para obtener parejas es-



Ciclógrafo.

tereoscópicas con una máquina de doble péndulo *(ilustración superior de la pág. 108)*, se empieza por registrar una figura que se obtiene soltando a la vez los dos péndulos. La segunda figura, que formará pareja con la anterior, se obtiene soltando un péndulo algo después que el otro. De este modo, el comienzo de la curva de uno diferirá en unos cinco grados respecto a la del otro. Las dos figuras resultantes han de montarse luego, una junto a la otra, con una distancia entre centros de unos 5 cm, para lo que se reducen de tamaño por un procedimiento fotográfico. Cuando se montan, su orientación debe ser tal que coincidieran si fuesen corridas y superpuestas. Los armonigramas estereoscópicos pueden conseguirse también con máquinas a base de engranajes, simplemente aumentando el radio del brazo que lleva la pluma en un 5 por ciento cuando se genera la segunda figura.

Hemos presentado varias versiones de armonígrafos fáciles de construir y hemos dado ejemplos de las figuras que son capaces de proporcionar. Sin embargo, el tema no quedaría completo si no mencionáramos los principios físicos y matemáticos fundamentales que están en la base de tales diseños. El movimiento armónico simple tiene una interpretación bien sencilla: es el resultado de proyectar sobre un diámetro las posiciones de un punto que recorre una circunferencia con velocidad constante. La posición del punto proyectado está determinada en cualquier instante por el radio de la circunferencia multiplicado por el seno trigonométrico del ángulo descrito por el punto proyectante. Este ángulo es igual a la velocidad angular multiplicada por el tiempo transcurrido. Este tipo de movimiento es rápido cerca del centro de la circunferencia y se va haciendo gradualmente más lento hasta pararse por un instante en el extremo. Acto seguido vuelve a acelerarse hacia el centro, para después reducirse de nuevo a cero en el extremo opuesto del diámetro. Tal movimiento debió serle ya familiar al hombre de las cavernas cuando se colgaba de un árbol: como lo es, hoy en día, a los chicos que se columpian. Pueden citarse otros ejemplos como el movimiento de una pesa que cuelga de una cinta de goma, o diversas vibraciones, tales como las de una cuerda de violín, las compresiones de aire en los instrumentos de viento a base de tubos y las de las partículas subatómicas responsables de la emisión de ondas electromagnéticas. En resumen, el sencillo movimiento tan maravillosamente representado en los armonigramas es un elemento básico de todos los fenómenos naturales.



Hipocicloides superpuestas a epicicloides

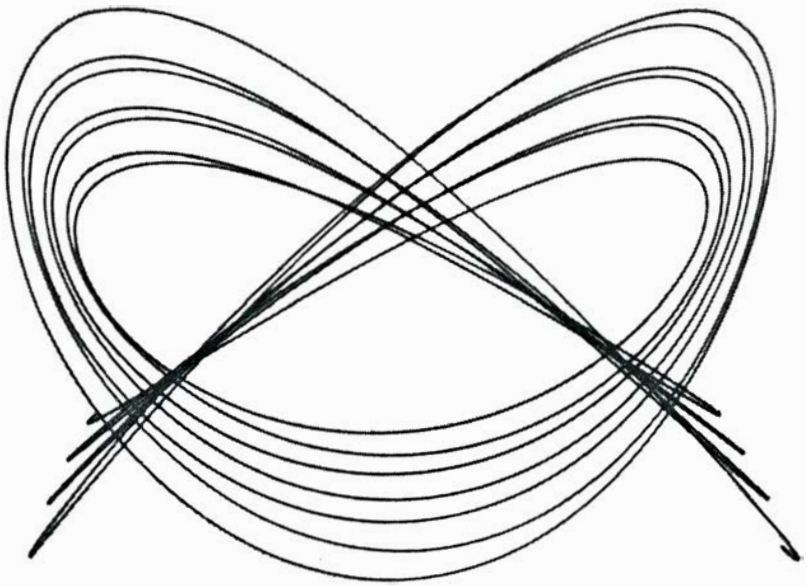


Figura obtenida con un péndulo de Blackburn

Taller y laboratorio

Construcción de un generador electrostático de Van de Graaff

C. L. Stong

La era moderna de la electrostática comenzó en 1929. En dicho año, un joven estudiante llamado Robert J. Van de Graaff, procedente de la Universidad de Oxford y que estaba trabajando en Princeton como becario, inventó el generador electrostático de cinta que actualmente se designa en todas partes con su nombre. El becario estaba interesado en obtener un potencial eléctrico elevado, continuo y constante, para acelerar partículas atómicas con objeto de bombardear núcleos y conseguir información acerca de su estructura.

Hoy en día, el acelerador de Van de Graaff puede verse en todo laboratorio importante de física nuclear de cualquier país; es el caballo de batalla para cualquier investigación precisa en dicho campo. El acelerador ha conseguido dar a las partículas energías superiores a ocho millones de voltios, y no es imposible que esta cifra se duplique. La máquina, en tamaño reducido, ha encontrado una amplia variedad de aplicaciones, en especial en las instalaciones de alta tensión para tratamientos médicos con rayos X.

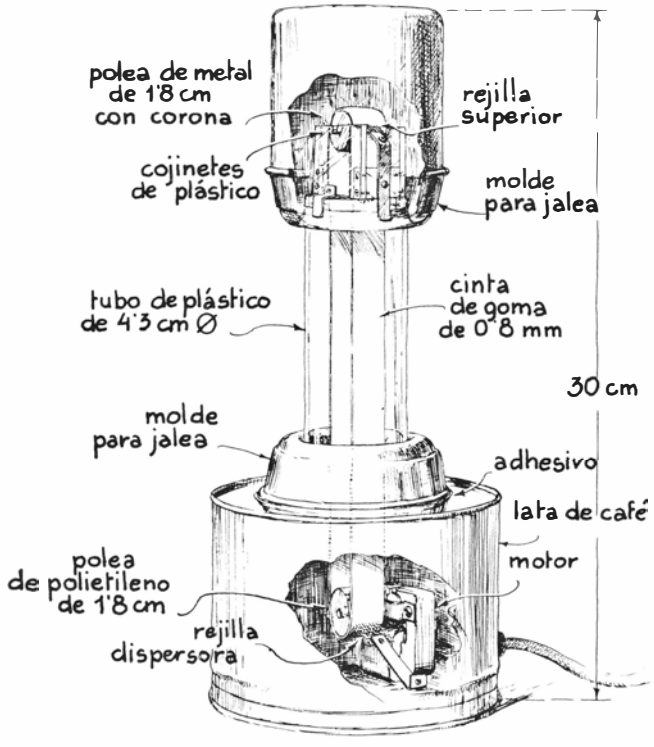
Entre las características más atractivas del generador de Van de Graaff están su relativa sencillez y su bajo coste. Robert W. Cloud, del laboratorio de investigación de altas tensiones del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha diseñado un modelo de tamaño reducido como un proyecto de construcción para aficionados *(véase la ilustración de la página derecha)*. Su funcionamiento es tan simple como su diseño. Un motor que va a 3000 revoluciones por minuto está alojado dentro de una lata de café vacía. Acciona una cinta de goma que pasa por una polea aislada y se introduce dentro de un cabezal superior. En cada extremo y cerca de la superficie de la cinta están situadas, rejillas, terminadas en pinceles, que actúan como peines colectores, conectadas cada una de ellas con sus respectivos terminales.

Cuando la máquina se pone en marcha, el rozamiento arranca electrones de la cinta en el extremo inferior motriz y los deposita sobre la polea de plástico. Las cargas positivas, remanentes en los lugares de la cinta que han perdido electrones, son llevadas por la cinta a la polea metálica situada en el extremo superior. Los electrones de la polea metálica pasan a la cinta, que es deficitaria en tales cargas. A medida que la máquina va funcionando, se acumulan fuertes cargas opuestas en las poleas.

Después de unos segundos o minutos, según sea la humedad ambiente, el campo originado en las poleas alcanza un valor suficiente para ionizar el aire cerca de las rejillas pincel colectoras. Un flujo de electrones pasa entonces del terminal superior hacia la cinta, que inicia su marcha hacia abajo. De modo semejante, los electrones transportados por la cinta entran en la región de ionización de la rejilla inferior y, a través del soporte de ésta, pasan al terminal inferior.

Mediante esta acción de bombeo, la cinta extrae continuamente electrones del terminal superior y los descarga hacia tierra pasando por el terminal inferior. Esto ocasiona una ganancia de carga positiva en el terminal superior que, a causa de la repulsión mutua de los "huecos" positivos, se distribuye uniformemente sobre su superficie exterior. Como consecuencia, no quedan cargas en la superficie interna. Teóricamente, la tensión eléctrica entre los terminales superior e inferior debería crecer indefinidamente.

Como en el caso de las máquinas eléctricas clásicas, en la práctica la carga alcanzada tiene un límite impuesto por la calidad del aislamiento. Cuando se llega a una tensión de unos 100.000 vol-



Generador Van de Graaff de pequeña potencia construido con latas vacías, moldes de repostería, un tubo de plástico y un motor de juguete. Tensión alcanzable: 50.000 volt.

tios, la carga se escapa como descarga en corona desde el terminal superior y como corriente de conducción a lo largo de la columna aislante, con un ritmo igual a los dos microamperios que es capaz de llevar la cinta transportadora. Aunque 100.000 voltios sea una cifra impresionante, la máquina no ofrece peligro, pues la capacidad del terminal superior para almacenar carga es pequeña.

Si se acerca un objeto esférico hasta una distancia de unos pocos centímetros del terminal superior de alta tensión, salta una pequeña chispa. En este tipo de descarga, el aire pasa rápidamente de ser un buen aislante a convertirse en conductor y la chispa descarga por completo el terminal. La reducción de la tensión de éste hace que el aire recupere su poder aislante y el terminal vuelve a ser cargado por la cinta. En cambio, si se acerca a dicho terminal un objeto con cantos vivos, se produce una descarga en corona que va quitando la carga y el potencial decrece de un modo paulatino. Tal dispositivo, con un espaciado ajustable, se usa a menudo en los generadores de Van de Graaff para mantener un potencial constante en el terminal.

El disponer de una fuente de alta tensión y corriente continua invita a realizar experimentos con la misma. Uno de los más divertidos es el de las bolas saltarinas. Se toma una media docena de bolas de corcho cuya superficie se hace conductora recubriéndolas con hollín o grafito. Se construye una caja con una tira de plástico transparente enrollada en forma de cilindro, que tiene por bases dos tapas metálicas, tales como las usadas en botes de alimentos. Las tapas se conectan a los terminales del Van de Graaff después de colocar las bolas en el interior de la caja. Cuando la máquina está en marcha, el campo electrostático hace que las bolas suban y choquen con la tapa superior, a la que entregan su carga de electrones, con lo cual caen, y el ciclo se va repitiendo mientras la máquina esté en marcha.

Sosténgase una aguja de coser mediante un aislante y conéctese la aguja al terminal superior de la máquina. La punta de la aguja lanza moléculas de aire ionizado como si de un chorro de gas a presión se tratara. Con ellas puede apagarse fácilmente una cerilla o una vela. Tal viento eléctrico puede emplearse para mover un motor rudimentario. Se toma una hoja de aluminio y de ella se recorta una cruz en forma de esvástica, con extremos bien puntiagudos. Con la punta de un lápiz se produce una indentación en su centro. Este se apoya en la punta de un clavo que atraviesa un trozo de cartón que le sirve de soporte. De este modo, la esvástica puede girar fácilmente en torno a la punta del clavo y lo hace vigorosamente cuando se conecta el clavo con el terminal de alta tensión del generador de Van de Graaff. El aire ionizado que fluye por las cuatro puntas proporciona la fuerza reactiva como en una turbina.

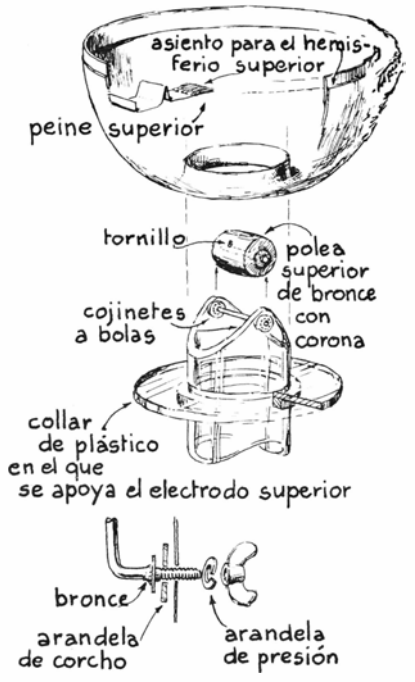
El generador de Van de Graaff es capaz de conferir a una persona una tensión de 50.000 voltios. Esta cifra supera en 20.000 voltios el potencial necesario para ionizar el aire a la presión atmosférica. Esto es suficiente para conseguir mantener de punta los cabellos del experimentador. Para demostrar este efecto, se pone uno de pie sobre un gran recipiente de vidrio o sobre una plataforma de madera sostenida por cuatro envases de vidrio de boca ancha. Unos segundos después de que el experimentador se mantenga en contacto con el terminal de alta tensión, observará cómo sus cabellos empiezan a levantarse. El cuerpo añade capacidad al terminal, de modo que la acumulación de carga eléctrica es superior a la normal. Al bajar, o al tocar un cuerpo unido a tierra, se experimenta una ligera sacudida, que no es peligrosa para una persona de salud normal.

Las lámparas fluorescentes lucen de modo brillante cuando se toca con ellas el terminal de alta tensión. Si la habitación no es muy clara, las lámparas de filamento también lucen, con colores diversos según el gas que contengan en su interior. Puede obtenerse una aurora boreal en miniatura hirviendo agua en un balón de vidrio hasta que el vapor haya desplazado el aire de su interior y cerrándolo seguidamente con un corcho. Una vez condensado parte del vapor, el aire enrarecido que queda en el interior muestra una luminiscencia verde rosada cuando el frasco toca el Van de Graaff.

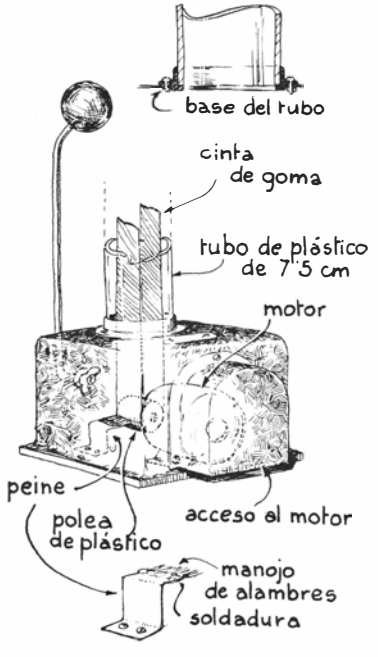
Quienes posean un equipo capaz de crear un alto vacío pueden intentar construir y operar un acelerador lineal y otros aparatos afines relacionados con la investigación nuclear. Tales proyectos, como los de construcción de ciclotrones caen dentro de las posibilidades de los aficionados, sobre todo si trabajan en grupos, pero no deben ser emprendidos alegremente.

Para accionar tales aparatos se requiere un Van de Graaff algo mayor que el descrito *(ilustración inferior de la página 104).* Difiere de éste en varios detalles importantes. Los puntos dispersores que cargan la cinta en su parte ascendente deben ser alimentados con un potencial de 5000 a 10.000 voltios obtenido con un conjunto transformador-rectificador. Las máquinas potentes emplean poleas metálicas en ambos extremos de la cinta, de las cuales la superior permanece aislada del terminal de alta tensión.

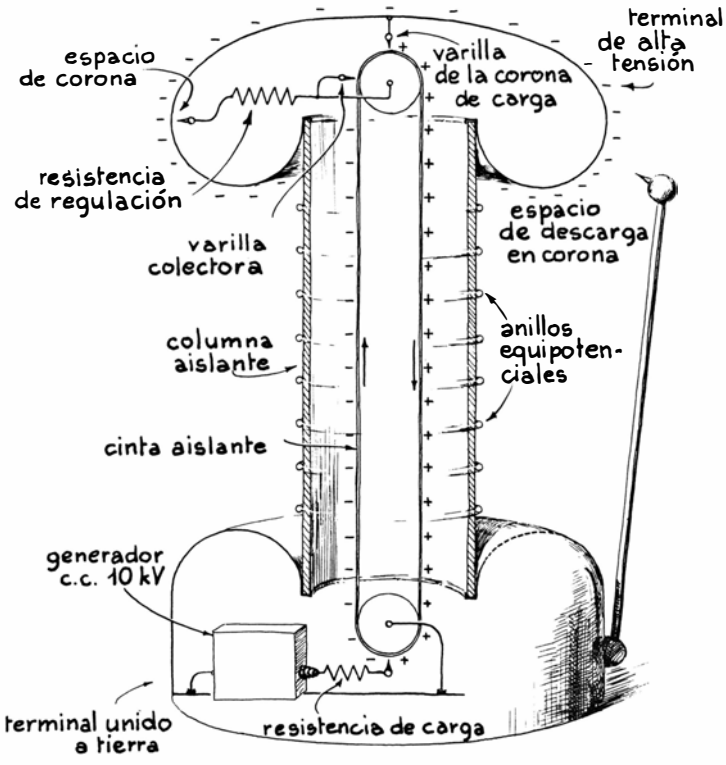
La carga es lanzada sobre la cinta cuando pasa a través de la descarga en



Detalles de un diseño ligeramente distinto correspondientes al terminal superior del pequeño generador de Van de Graaff



Detalles de la polea y del motor de la parte inferior del generador de Van de Graaff



Representación semiesquemática de una máquina de Van de Graaff potente

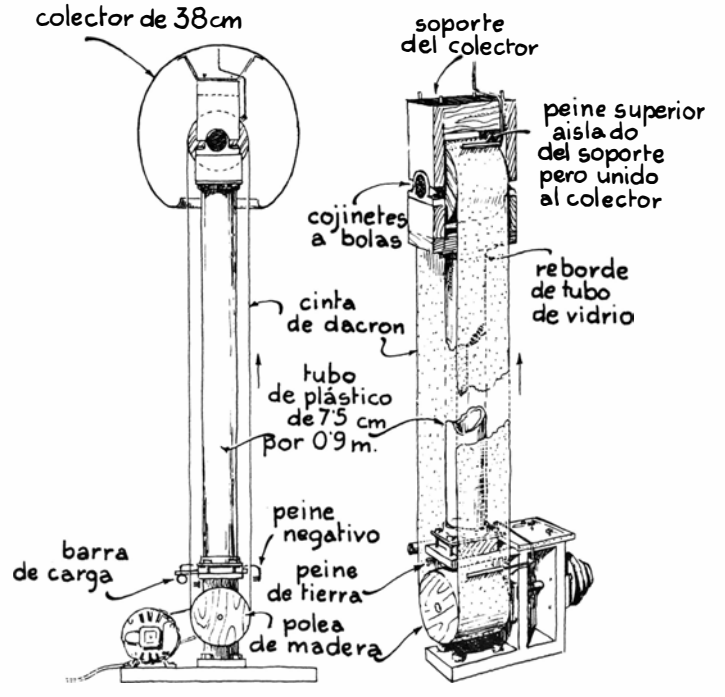
corona existente entre los puntos inferiores y la polea impulsora, que está conectada a tierra. Unos puntos semejantes se encuentran dentro del terminal superior y recogen las cargas de la cinta ascendente, que son llevadas a la polea superior. Después de un corto período inicial, la polea superior adquiere una tensión elevada y pasa una corriente hacia el terminal superior a través de una resistencia de regulación. En este circuito, puede incluirse también un trayecto de descarga en corona cerca de la superficie interna del terminal. Encima de la polea hay una segunda serie de puntos dispersores (varilla de carga), conectados directamente al terminal de alta tensión. La diferencia de potencial entre la polea superior (que es activa gracias a la caída de tensión producida por la corriente que pasa por la resistencia de regulación y la corona) y el terminal de alta tensión motiva que estos puntos dispersen una carga de signo opuesto sobre la parte descendente de la cinta. Se elige el valor de la resistencia de regulación de forma que los dos lados de la cinta trabajen equilibrados. El valor de dicha resistencia puede averiguarse de un modo aproximado aplicando la ley de Ohm. (En máquinas pequeñas es del orden de 40 megohmios.) Las cintas para las máquinas potentes suelen ser de tejido engomado y marchan a una velocidad comprendida entre 1200 y 1800 metros por minuto.

La capacidad del terminal superior para almacenar cargas depende de su tamaño. Su aptitud para mantener las cargas varía con su forma. El terminal ideal debería ser esférico, pero por desgracia no puede ser así, ya que debe haber sitio para la entrada de la cinta. La forma debe elegirse de tal modo que la intensidad del campo eléctrico sea siempre menor que el valor para el cual se inicia la descarga en corona o la chispa. Por ello, la abertura debe tener bordes entrantes y las caras enfrentadas de los terminales superior e inferior deberían ser idénticas. Los terminales se suelen fabricar con aluminio laminado.

En la actualidad, los generadores de Van de Graaff algo mayores, en el dominio del millón de voltios, que se destinan a aplicaciones científicas o industriales, suelen montarse todos dentro de un tanque de acero que contiene freón, anhídrido carbónico o un gas análogo a una presión de bastantes atmósferas. La alta presión sirve para aumentar el poder aislante del aire y de este modo crecen las capacidades de tensión y de corriente de la máquina.

En las máquinas de Van de Graaff diseñadas para tensiones superiores a 200.000 voltios es importante la distribución de cargas a lo largo de la columna aislante (e incluso a lo largo de la cinta móvil). Las columnas de las máquinas aisladas con aire, que usen cintas de más de diez centímetros de ancho, deben ser provistas de anillos equipotenciales dispuestos a lo largo de la columna y espaciados unos cinco centímetros entre sí.

¡ATENCION! Cualquiera que emprenda la construcción de un generador de Van de Graaff potente no debe perder de vista que no se trata de un juguete.



Generador de Van de Graaff con cinta exterior y excitación interna

Estas máquinas, que son potencialmente letales, pueden revelar maravillas que Otto de Guericke nunca hubiera podido imaginar, pero, a diferencia de su bola de azufre, encierran dentro de sí la fuerza del rayo.

F. B. Lee, de Kenmore, Nueva York, nos aporta más datos sobre estas máquinas. Dos detalles importantes para el diseño de los generadores Van de Graaff son: 1.º el paso de 300 cm² de cinta por segundo por las poleas produce, aproximadamente, una corriente de un microamperio; 2.º la tensión máxima desarrollada es igual a 28.000 veces el valor del menor radio de curvatura del colector expresado en centímetros.

De este modo, una esfera de 30 centímetros de diámetro podrá alcanzar un límite teórico de 420.000 voltios. Los orificios existentes en la esfera, y que son necesarios para la entrada de la cinta, alteran las características del campo eléctrico y reducen el máximo teórico. La forma más eficaz para un colector práctico es la de un esferoide ligeramente achatado en su fondo, con radios de curvatura mínimos localizados a una distancia razonable del aislante para impedir que se produzcan chispas a lo largo de la superficie del aislante.

La tensión máxima elegida por el autor del diseño determina el tamaño del colector. Para conseguir alcanzar una fracción importante de la tensión límite teórica, el colector debe estar separado de las demás partes metálicas por lo menos una distancia igual a dos o tres diámetros. La distancia debería ser mayor si hubiera partes metálicas con cantos agudos. Puede ser algo menor si todas las partes están cubiertas por un blindaje metálico redondeado de gran radio de curvatura. La anchura del orificio por el que entra la cinta en el interior del colector no debe ser mayor que la mitad del diámetro del propio colector y la abertura debería estar curvada hacia dentro con un radio de curvatura amplio.

Aunque si el metal está muy pulido el colector resulta más vistoso, ello no es esencial. Las pequeñas imperfecciones de la superficie limitan poco la tensión máxima alcanzable, si está bien redondeada. Deben evitarse los cantos agudos y las rebabas. Las hilas y partículas de polvo pueden reducir la tensión hasta en un 40 por ciento del máximo teórico si sobresalen de la superficie un uno por ciento del radio.

El aluminio laminado comercial sin pulir, libre de hilas y de polvo, puede recoger cerca del 85 por ciento del máximo teórico. Un buen pulido aumenta la tensión en un uno por ciento. La concentración de carga en torno al orificio de entrada de la cinta absorbe el 14 por ciento restante, cantidad que varía desde luego con el tamaño del orificio y su distancia a los otros conductores.

El valor que se quiere que tenga la corriente de salida determina el tamaño de la cinta y la velocidad a que debe moverse.

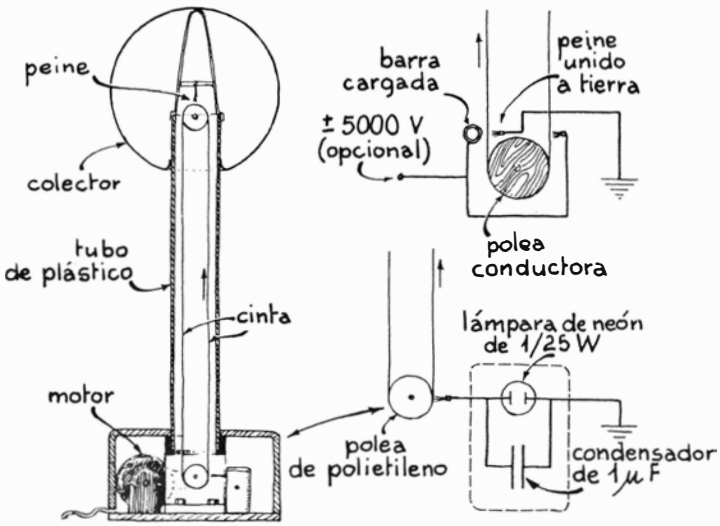
El fijar esta especificación no es tan simple como parece, porque las propiedades de los materiales utilizados fijan límites de velocidad tanto para la cinta como para los cojinetes. En teoría, para conseguir la máxima corriente debería emplearse la mayor velocidad posible de la cinta. Pero cuando la velocidad de la cinta supera los 30 metros por segundo, surgen inconvenientes.

Las grandes velocidades aumentan la tendencia al desgaste en los bordes de la cinta y a que ésta se desempalme. Con velocidades elevadas, hay que tensar mucho la cinta, sobre todo si las poleas son pequeñas, y esto ocasiona problemas en los cojinetes. Las dificultades de lubricación limitan la velocidad de los ejes a unas 5000 revoluciones por minuto en los cojinetes de fricción. El nivel de ruido de los cojinetes a las bolas se hace muy molesto por encima de esta velocidad, a no ser que se tomen precauciones especiales para reducirlo. Con velocidades de la cinta superiores a 30 metros por segundo, las pérdidas de potencia debidas al rozamiento con el aire son ya apreciables. Además, parte de la carga parece ser expulsada de la cinta cuando las velocidades son excesivas, fenómeno para el cual carecemos de explicación.

Las cintas se fabrican con cualquier material aislante: papel, tela, goma, plástico, etc. La goma, que es poco resistente al ozono, tiene una vida limitada, pero como puede obtenerse de neumáticos usados a un coste nulo, es difícil que tenga competencia. El rayón, nilón, dacrón y los tejidos unidos con adhesivos) son casi tan buenos como la goma. Cuando se usan estos materiales, hay que modificar la posición de los pinceles colectores de la corona. Las cintas de tejido duran más que las de goma, son más silenciosas y necesitan menos potencia de tracción, pero tienden a deshilacharse en los bordes. Esto se puede arreglar con un poco de laca. Teniendo en cuenta todos los factores, preferimos las cintas de neopreno empalmadas en diagonal.

La polea superior debe ser de un material eléctricamente buen conductor, tal como la madera o la baquelita. No extrañe tal afirmación: a estas tensiones tan altas tales materiales son muy buenos conductores para las débiles corrientes que se presentan. Una buena polea de madera puede obtenerse a base de serrín aglomerado con cola. La polea inferior debe ser también buena conductora de la electricidad si se emplea un generador auxiliar de 5000 a 10.000 voltios para dispersar la carga sobre la cinta.

Si la máquina es autoexcitable (es decir, si la cinta se carga eléctricamente por rozamiento), la polea inferior debe ser construida o estar recubierta con un material aislante de elevada resistividad. Una capa de polietileno de 0,8 mm de espesor constituye un excelente recubrimiento para las pequeñas poleas de madera. Las poleas deben ser torneadas con una ligera corona en cuyo borde se apoya el tubo de polietileno. Este puede obtenerse cortando una botella cilíndrica de este material. El tubo se introduce a presión sobre el núcleo de madera.



Generador de Van de Graaff con cinta interior y excitación externa

En las máquinas autoexcitadas, la elección del material de la polea y de la cinta determina la polaridad de la carga del colector. Una cinta de goma con una polea inferior de polietileno o de poliestireno extrae electrones del colector y éste se carga positivamente.

Las cintas pueden moverse por dentro o por fuera del soporte aislador. La economía, la sencillez y el disponer de corrientes intensas resultan beneficiadas con el empleo de cintas exteriores. En cambio, el aspecto externo de la construcción es mejor con cintas interiores. El primer tipo de soporte permite el uso de un aislante pequeño, relativamente barato, con pérdidas de corriente reducidas y deterioro mínimo ocasionado por la descarga en corona (a causa del ozono). Esto permite el empleo de cintas más anchas para una abertura dada del colector. Se reducen también al mínimo los problemas que proceden de desigualdades de potencial a lo largo del aislador.

Al elegir el material de la columna aislante hay que evitar el empleo de sustancias higroscópicas o fibrosas, pues de lo contrario se producirían pérdidas a través de la humedad que se formaría en su superficie. Hay que tener también en cuenta sus propiedades mecánicas, tales como tenacidad, rigidez y dureza. Finalmente deben ser de precio razonable.

La tubería de fibra poliéster laminada o la de cloruro de polivinilo cumplen bien los requisitos expuestos y se encuentran disponibles en tamaños normalizados. El cloruro de polivinilo es el menos higroscópico y puede ser doblado y moldeado calentándolo hasta su punto de reblandecimiento por inmersión en parafina caliente.

Las puntas de peine o corona para aplicar la carga a la cinta pueden ser de índole muy variada. A menudo una simple aguja de gramófono actúa de una manera tan eficaz como la más elaborada púa. Un mechón de alambres, sujeto por un extremo y peinado como una escoba por el otro, actúa como un peine adecuado, al igual que lo hace un pequeño rectángulo de tela metálica.

Hay que tener cuidado en evitar la dispersión no conveniente de cargas sobre la cinta. Esto puede ocurrir si se mezclan las cargas de una y otra cara de la cinta cerca de las poleas. El problema se resuelve montando los peines sobre accesorios que permitan su ajuste fácil en una amplia variedad de posiciones y seleccionando los tamaños de los peines para restringir las áreas sobre las que se dispersan las cargas.

Taller y laboratorio

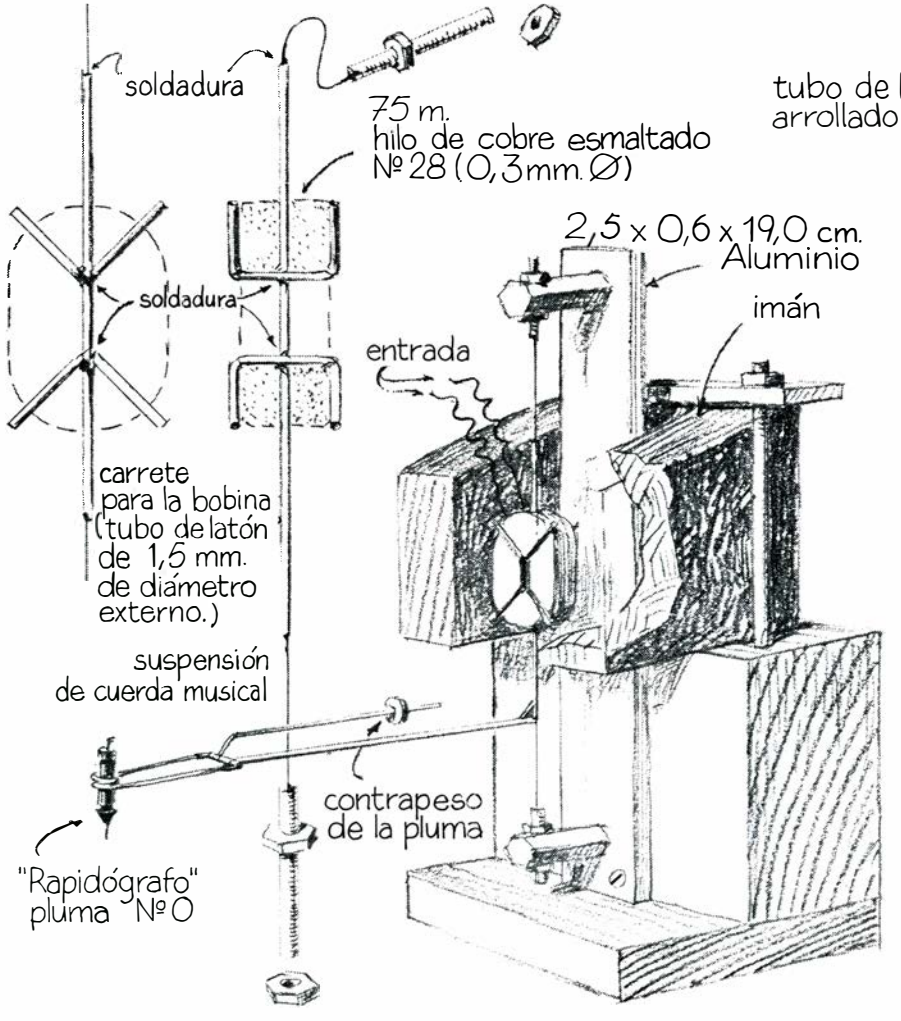
Un motor sencillo, con dispositivos compensadores, que permite realizar un registrador gráfico casero

C. L. Stong

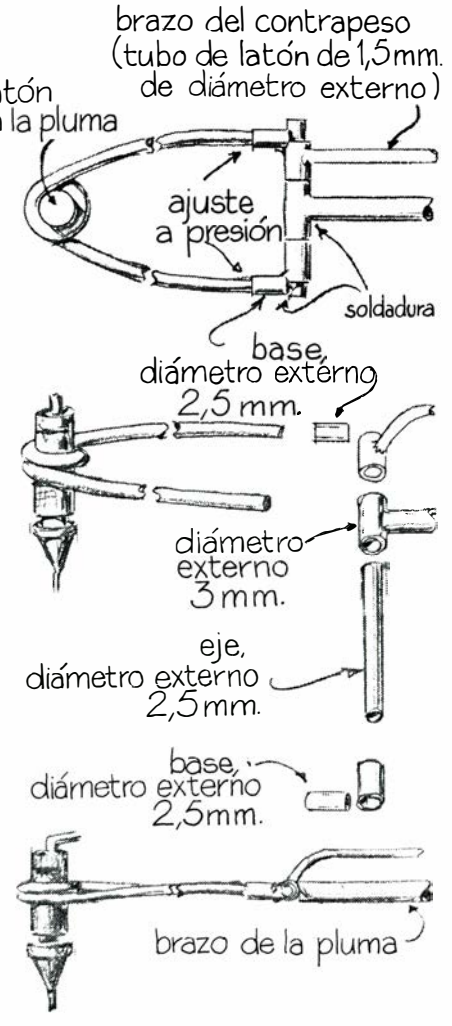
A los aficionados les resulta difícil construir registradores gráficos capaces de inscribir señales de frecuencias superiores a cinco ciclos por segundo. Tales instrumentos se utilizan en los electrocardiógrafos y electroencefalógrafos y en otros aparatos que registran señales telemétricas. Para conseguir registradores capaces de responder a frecuencias de más de unos pocos ciclos por segundo, se ha solido reducir al mínimo tanto la masa como los rozamientos de las partes móviles. Las partes del motor que accionan la pluma pesan unos pocos gramos solamente y los ejes soporte giran sobre pivotes fabricados con precisión o sobre asientos de rubí. La fabricación de tales mecanismos requiere la habilidad de un relojero.

J. Barry Shackleford, un analista de modelos de la Computer Sciences Corporation de Huntsville, Alabama, ha recurrido a otro esquema para conseguir el buen funcionamiento que se desea. El motor que construyó para el accionamiento de la pluma es relativamente tosco y puede fabricarse en casa sin ningún gasto, pero le suministró potencia mediante amplificadores de transistores, con circuitos de realimentación para compensar sus deficiencias mecánicas. Aunque las características del registrador de Shackleford no igualan a las de los instrumentos comerciales, el aparato es, sin embargo, adecuado para efectuar experimentos de diversas clases. Shackleford describe su construcción como sigue:

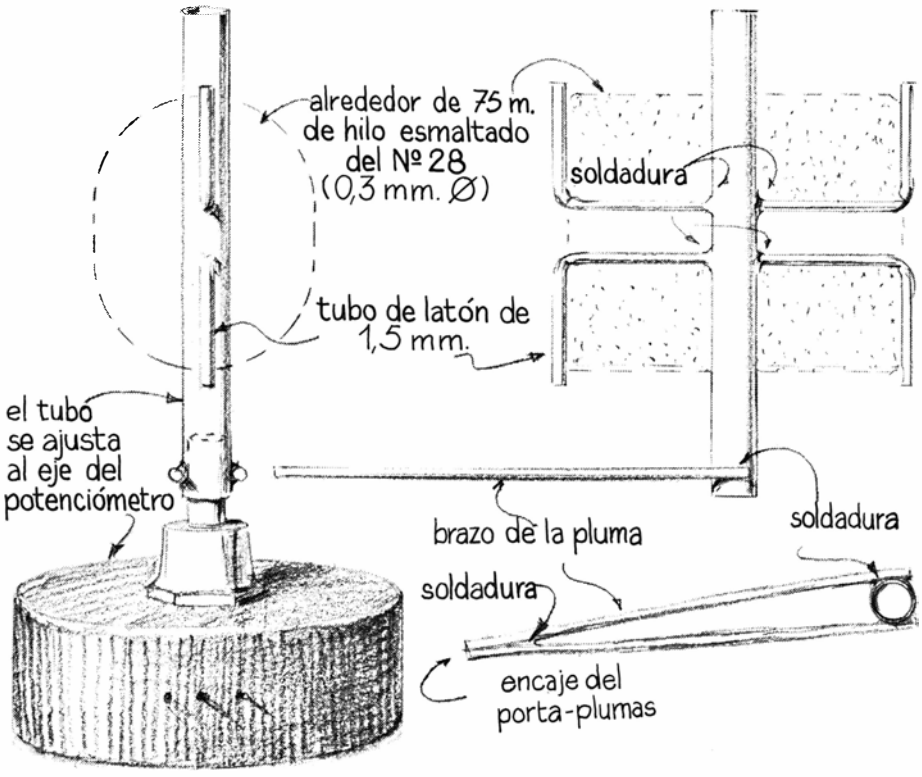
Los registradores gráficos están compuestos de tres subconjuntos principales: un motor que acciona la pluma, un mecanismo que arrastra el papel debajo de la pluma a una velocidad conocida y un circuito eléctrico que aplica la corriente de señal al motor de la pluma. Yo he fabricado dos motores estructurales simi-



Motor de muelle de torsión para pluma, de J. Barry Shackleford



Detalles del conjunto articulado



Disposición de la bobina para el servomotor

lares, pero que emplean dispositivos de medida diferentes: un resorte de torsión en un caso y un mecanismo electrónico de realimentación en el otro.

Ambos motores tienen una bobina de hilo de cobre fino que puede girar libremente alrededor de su eje vertical situado entre los polos de un imán permanente. La bobina de uno de los motores está sostenida en sus extremos superior e inferior por una cuerda musical fina en tensión; la cuerda actúa como un resorte de torsión *(véase la ilustración de la izquierda en la página anterior).* Una corriente eléctrica aplicada a la bobina genera un campo magnético.

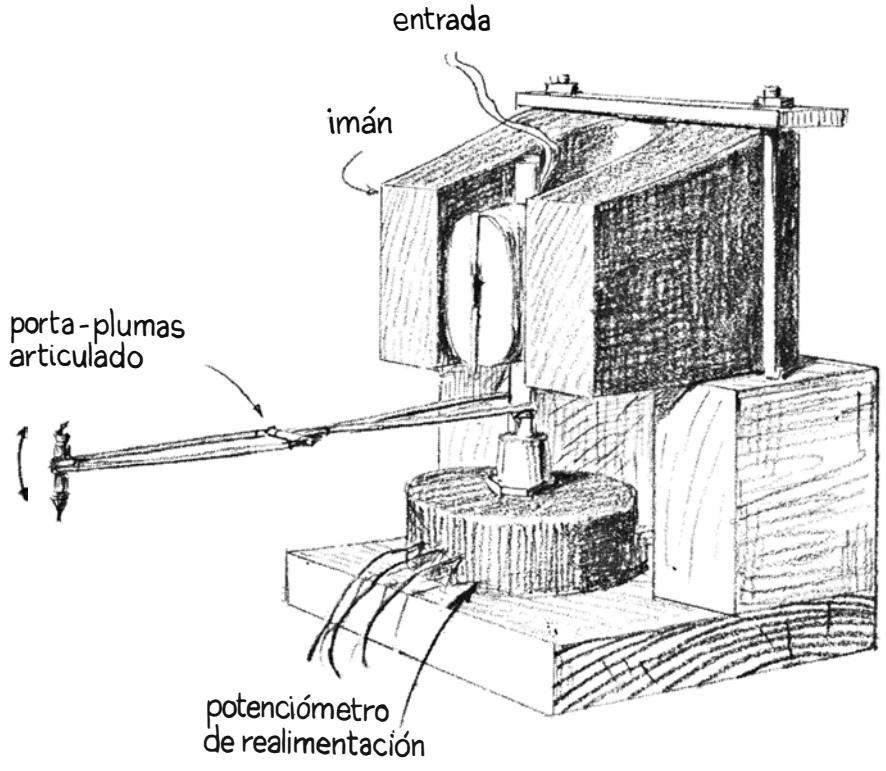
La fibra de torsión se ajusta inicialmente de tal manera que la bobina quede suspendida en una posición en la que el campo magnético inducido forme ángulo recto en el campo del imán. El campo inducido interactúa con el campo permanente creándose un par mecánico que hace girar la bobina a una posición para la que los sentidos de ambos campos coincidan. El par crece proporcionalmente a la corriente eléctrica en la bobina. La fibra de torsión ejerce un par antagonista que crece proporcionalmente al ángulo de la bobina con su posición de cero o posición inicial. El motor es esencialmente un galvanómetro del tipo desarrollado en el siglo XIX por el físico francés Arsène d'Arsonval. Su principio es similar al de los motores de la mayoría de los amperímetros y voltímetros, diferenciándose tan sólo en que los pivotes, el eje y el muelle capilar de los medidores convencionales se han sustituido por la fibra de torsión.

No es necesario ser muy habilidoso para fabricar el motor. La bobina se arrolla en un bastidor de tubo de latón de 1,5 mm. El brazo que sostiene la pluma se fabrica también de este tubo, cuyo peso es de alrededor de 130 mg por cm. Un tubo de unos 5 cm de longitud forma el eje rígido del bastidor.

A este eje se sueldan un par de soportes en forma de U con los brazos situados en dirección opuesta. La bobina se arrolla sobre los soportes, que tienen 2,5 cm de ancho y 1 cm de profundidad. Tubo de latón de este diámetro puede encontrarse en los establecimientos de artículos para aficionados, especialmente en los dedicados a aeromodelismo.

Corte el tubo colocándolo sobre una pieza plana de cartón y serrándolo con el cuchillo más afilado de la casa. Deje el tubo rodar libremente bajo el cuchillo de tal forma que la acanaladura resultante rodee el latón. La pared del tubo es delgada. Use una presión moderada para evitar aplastarlo. Luego habrá que volver a afilar el cuchillo. Las virutas de los extremos abiertos del tubo pueden eliminarse con un pequeño taladro.

Las partes se unen con soldadura. Para hacer la unión con un mínimo de material, se limpia primero el latón en los puntos que han de soldarse y se estaña cada uno de ellos con un soldador pequeño. Una vez dispuestas las partes en la posición deseada, y debidamente sujetas, se coloca una gota de soldadura en los puntos estañados y se calienta la junta con un mechero de propano ajustado para producir una llama muy pequeña.



Vista general del servomotor

Una vez montado el bastidor, se añade la fibra de torsión, que es simplemente un trozo de cuerda musical de unas 8 décimas de mm de diámetro (calibre núm. 20 de Brown and Sharp). La cuerda Mi de un violín será suficiente. Se la hace pasar por dentro del eje del bastidor y se la suelda en su lugar en los extremos del mismo. Use un fundente ácido y poca soldadura para hacer la unión. Caliente con un soldador pequeño para evitar destruir el temple de la cuerda. Elimine el exceso de fundente ácido limpiándolo con alcohol y aplique una capa fina de cemento plástico al latón.

La bobina está formada por 75 m de hilo de cobre esmaltado de calibre 28 (0,3 mm de diámetro). Enrolle el hilo sobre el bastidor al azar, sin intentar hacer capas uniformes. La resistencia de la bobina resultante es de unos 15 ohmios. Los extremos de la bobina se conectan a porciones de hilo flexible aislado de 0,5 mm de diámetro. Soldar el interior del terminal flexible a un extremo del hilo de cobre, aislar la junta con un poco de cemento plástico y atarla al eje rígido con un hilo de seda antes de arrollar la bobina. Al terminar el bobinado, hacer lo mismo con el otro extremo y amarrar ambos terminales sobre el eje a una distancia de medio centímetro por encima de la bobina. El conjunto de la bobina pesará alrededor de 25 gramos.

El brazo que sostiene la pluma es un tubo de 32 mm de longitud. Soldar el brazo al eje rígido paralelamente al eje de la bobina. Añadir una abrazadera pequeña del mismo tubo para robustecer la junta.

Incidentalmente, la repuesta a la frecuencia del motor de la pluma varía inversamente a la longitud del brazo. Brazos de hasta 200 mm de longitud pueden utilizarse para registrar frecuencias de hasta dos o tres ciclos por segundo, tales como las ondas sísmicas y los microterremotos. Para registrar los latidos del corazón o las ondas cerebrales, la longitud del brazo desde el centro del eje rígido a la punta de la pluma no deberá ser mayor de 75 mm, incluyendo el conjunto articulado que sostiene la pluma.

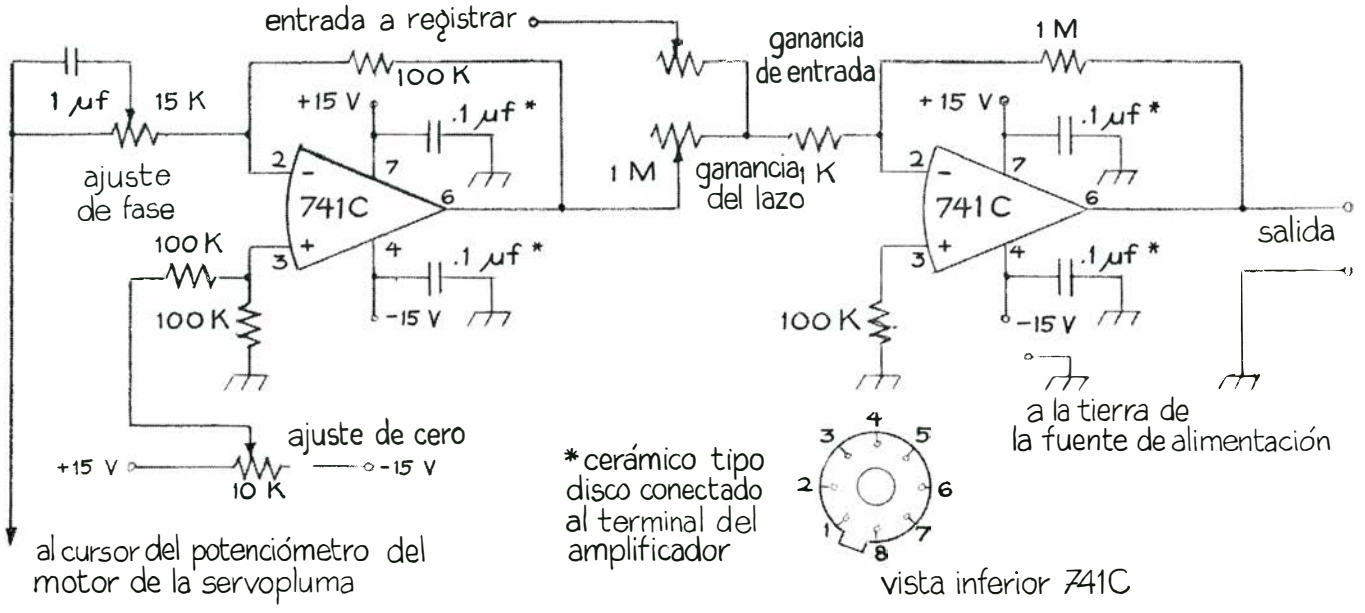
La articulación se hace con tubo de latón de dos diámetros: 3 mm y 2,5 mm *(véase la ilustración inferior izq. de la página 114).* Tubos de estos tamaños pueden introducirse uno dentro del otro y formar un conjunto deslizante. Un trozo de 6 mm del tubo de 3 mm de diámetro se suelda en ángulo recto al extremo del brazo de la pluma. Este tubo sirve como cojinete de la articulación. Otro trozo de 16 mm del tubo de 2,5 mm se desliza en el interior del cojinete y se centra para formar el eje. Se cortan dos collares del tubo de 3 mm, cada uno de 5 mm de longitud, y se deslizan sobre las partes salientes del eje. Con tubo de 1,5 milímetros de diámetro se hace un yugo para sostener la pluma.

La respuesta a la frecuencia varía de forma inversa a la inercia del sistema de escritura. Es preferible una pluma ligera de tipo capilar, como los radiógrafos números 0 o 1. Estas plumas pueden obtenerse en establecimientos dedicados a artículos de delineación. La punta tiene un depósito cilíndrico de tinta terminado en un cono del que sale un tubo capilar que llega hasta el papel. El flujo de tinta se regula mediante un hilo metálico fino que se prolonga a través del capilar hasta el papel.

La parte superior de este hilo termina en un peso cilíndrico que añade inercia al sistema. Se corta y se desecha el peso, se desliza el hilo en el interior de un tubo de latón de 1,5 mm de diámetro y se fija a él aplastando el tubo. El extremo superior del tubo se dobla en ángulo recto para que descanse sobre el borde superior del depósito de tinta. El codo se hace en un punto tal que el extremo inferior del hilo llegue a la punta del capilar. La sustitución del tubo de latón por el peso cilíndrico no sólo reduce la inercia del sistema, sino que además aumenta la capacidad del depósito de tinta.

El yugo que soporta la pluma se construye arrollando dos vueltas de tubo de latón alrededor del depósito. Los extremos del tubo se prolongan en ángulo agudo desde el lazo así formado. Cuando la distancia entre ellos es de alrededor de 13 mm, se doblan hasta hacerlos paralelos y se introducen dentro de los enchufes de la articulación *(véase la ilustración de esta pág.).* Roger Hayward, que ilustra esta sección, sugirió la sustitución de la articulación por una tira corta de chapa delgada de metal, como, por ejemplo, una arrastradera de latón. Esta tira sería más ligera que la actual articulación y más fácil de fabricar. Es algo que debe intentarse.

La bobina y el brazo de la pluma se sostienen en un soporte vertical que tiene un par de tornillos de ajuste enfrentados, a los que va unida la cuerda de torsión. La cuerda pasa por un hueco pequeño próximo al final de cada tornillo y se suelda a este lugar. Los tornillos



Esquema del circuito del amplificador diferencial y del amplificador sumador

son capaces de ejercer un esfuerzo de alrededor de 4,5 kg sobre la cuerda. El imán permanente está fijado a un bloque de madera unido a una base del mismo material.

La bobina se centra entre los polos en la región de campo magnético más intenso. La intensidad del campo puede examinarse visualmente cubriendo el imán con una hoja de cartón cuya superficie se empolva con limaduras de hierro. Con el imán fijo en su posición, se gira uno de los tornillos unidos a la cuerda de torsión media vuelta. Girar el otro tornillo en dirección opuesta hasta que el eje de la bobina forme un ángulo recto con el campo magnético. Apretar las tuercas. Este ajuste carga el hilo tanto a torsión como a tensión.

Mi instrumento tiene un imán cuyo entrehierro es de 3 cm, con una anchura de 4,5 cm. La inducción magnética del campo es de 2.075 Gauss. El motor de la pluma puede alimentarse desde cualquier amplificador que desarrolle 15 vatios y cuya impedancia de salida sea de unos 15 ohmios.

Mi segundo motor es similar al tipo de D'Arsonval, pero desarrolla un par mucho mayor. Es del tipo servo: la bobina se monta sobre el eje de un potenciómetro que desarrolla la tensión de referencia. La tensión de referencia se realimenta a la entrada de un amplificador diferencial. El sistema de realimentación sustituye los muelles de torsión del instrumento de D'Arsonval y estabiliza su funcionamiento. Por ejemplo, las variaciones en el rozamiento entre la pluma y el papel tienen poco efecto sobre la respuesta del sistema.

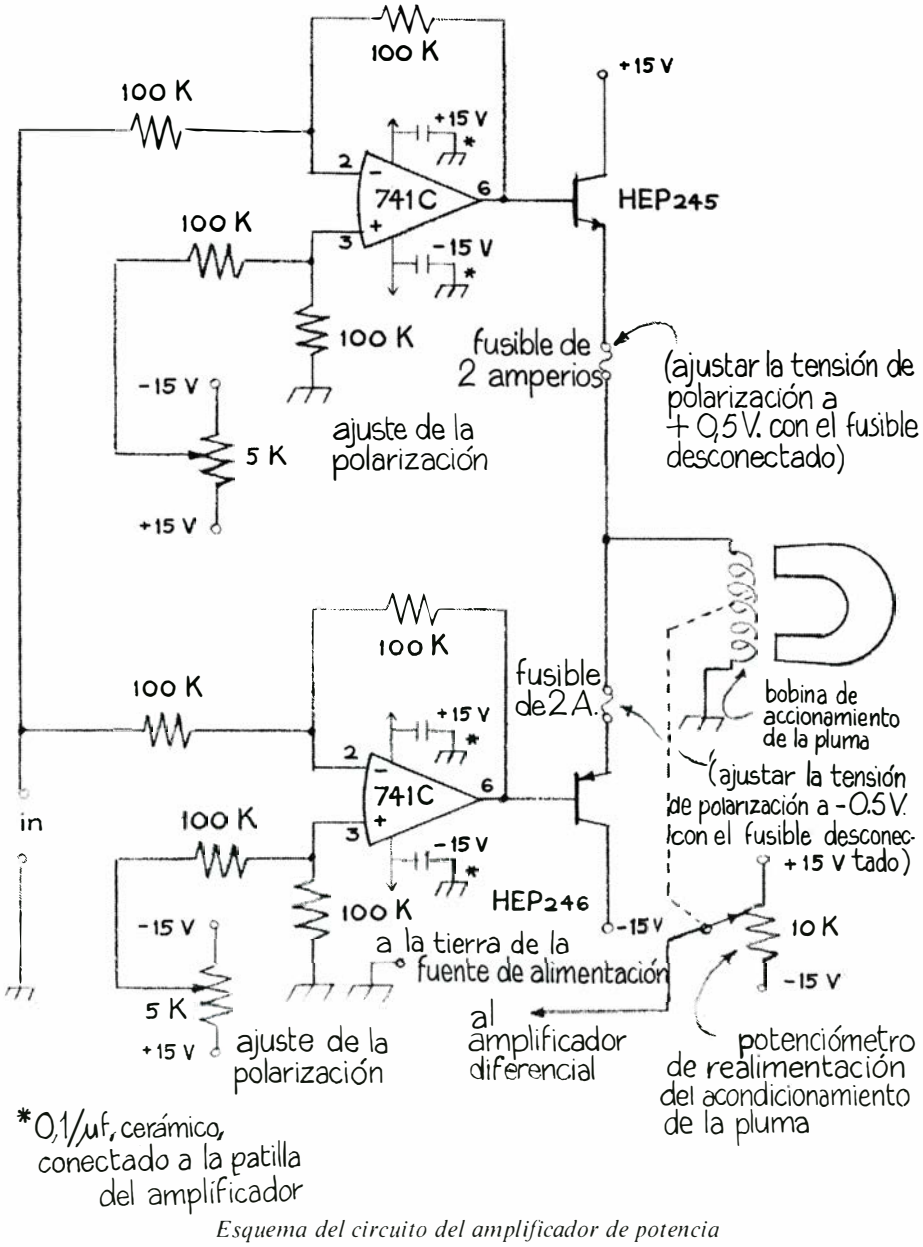
El potenciómetro debe ser del tipo de bajo rozamiento, preferiblemente con cojinetes de bolas. Un tipo apropiado es el Helipot 6502 que tiene una resistencia nominal de 10.000 ohmios. La resistencia del potenciómetro no debe exceder de 20.000 ohmios. El eje del bastidor sobre el que se arrolla la bobina lo constituye ahora un tubo de latón de 5 cm de longitud que encaja con el eje del potenciómetro *(véase la ilustración superior de la página 115)*. Los soportes en forma de U, hechos con tubo de latón de 3 mm, se sueldan al eje rígido, igual que se hacía en el bastidor del motor de la pluma del tipo de D'Arsonval. El bastidor se aísla con cemento plástico, se arrolla una bobina idéntica y se le dota de un brazo con pluma. El potenciómetro se monta con el eje hacia arriba sobre una base de madera. El imán permanente se fija a un bloque de madera unido a la base.

Se conecta el potenciómetro a una fuente de tensión de unos 15 V. Se conecta un voltímetro entre un terminal de la fuente y el brazo deslizante del potenciómetro, girando luego el eje del potenciómetro hasta que el voltímetro indique exactamente la mitad de la tensión de la fuente. Sin modificar la posición del eje, se hace girar sobre él el tubo de latón del conjunto de la bobina hasta que el eje horizontal de ésta forme un ángulo recto con el campo magnético.

Aunque este servomotor es más potente que el tipo de D'Arsonval, no puede accionar un dispositivo de escritura de alto rozamiento, como un lápiz o una tiza. Las plumas con punta de fieltro duro o de plástico poroso funcionan bien. Sin embargo, en términos de respuesta de frecuencia conviene hacer mínima la masa del conjunto, sobre todo en el extremo del brazo de la pluma, por lo que, cuando empleo una pluma de fieltro, separo la mayor parte del cuerpo y conservo solamente la punta y el depósito de tinta. Con este servomotor no suele requerirse contrapeso.

El circuito electrónico del registrador incluye tres amplificadores que están interconectados formando un lazo cerrado. La señal a registrar se aplica al terminal de entrada de un amplificador sumador *(véase la ilustración de la página anterior)*. El amplificador sumador puede aceptar dos señales de entrada, amplificando su suma algebraica. La salida del amplificador sumador se introduce en la entrada del amplificador de potencia que acciona el motor de la pluma. El potenciómetro, que está unido mecánicamente al eje del motor, desarrolla una tensión que varía en amplitud y polaridad de acuerdo con la posición del eje.

La tensión del potenciómetro, que se conoce como tensión de realimentación,



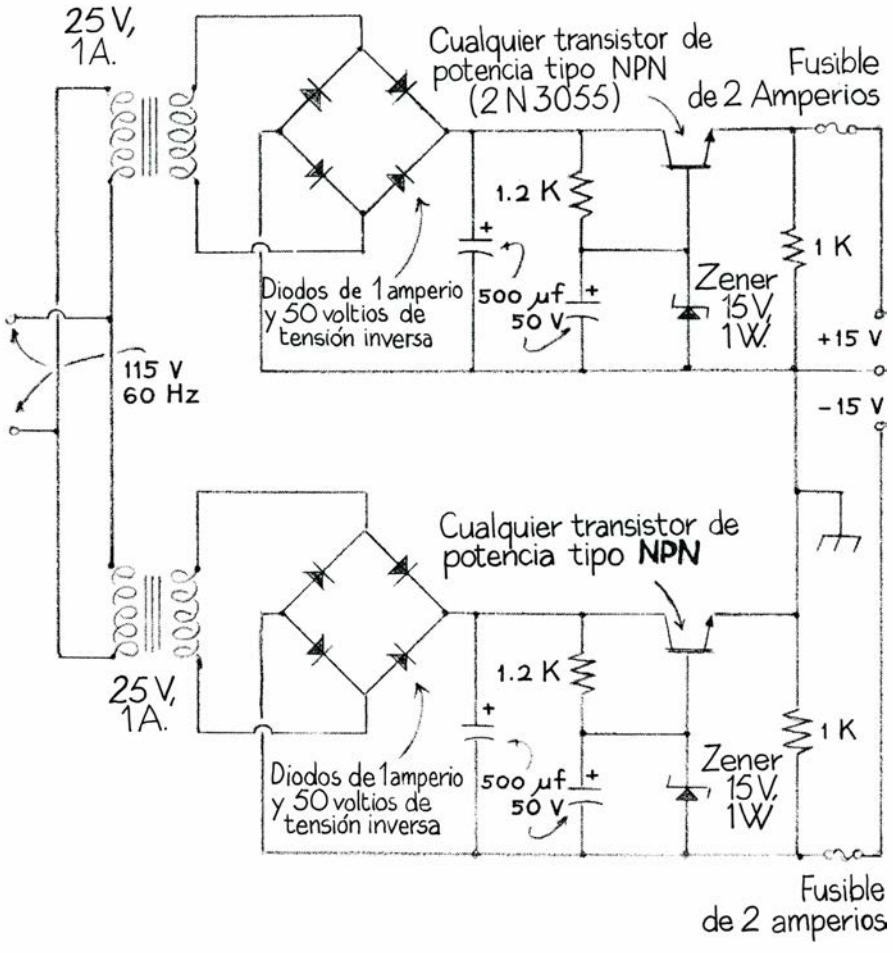
Esquema del circuito del amplificador de potencia

se aplica a un terminal de entrada en un amplificador diferencial. El amplificador diferencial puede aceptar dos señales de entrada, amplificando su diferencia algebraica. La salida del amplificador diferencial se aplica al segundo terminal de entrada del amplificador sumador, cerrándose así el lazo.

Una tensión de referencia ajustable, desarrollada en un potenciómetro conectado a la fuente de alimentación, se aplica al segundo terminal del amplificador diferencial. En ausencia de señal a registrar, la diferencia amplificada entre la tensión de realimentación y la tensión de referencia se aplica, a través del amplificador-sumador, al amplificador de potencia. Alimentado de este modo, el motor de la pluma gira para situarse en aquella posición que reduzca a cero la diferencia entre la tensión de realimentación y la de referencia, deteniéndose así el motor. Si la tensión de referencia se modifica manualmente, la tensión diferencia resultante hace que el motor busque de nuevo aquella posición en la que la diferencia de tensiones se reduce a cero. Por lo tanto, la pluma del registrador puede colocarse en el punto del papel que se desee, ajustando la tensión de referencia.

Una señal aplicada al amplificador sumador alimenta de la misma forma al amplificador de potencia. El motor busca una posición en la que la suma de la tensión de señal y la tensión diferencia se reduzca a cero. Las tensiones en el lazo de realimentación se amplifican automáticamente, con el resultado de que el sistema tiende a aplicar al motor la potencia que éste necesita para mover la pluma, con independencia de las variaciones que se produzcan en el rozamiento entre la punta y el papel.

Aunque el sistema tiene 82 transistores, su construcción es bastante sencilla. A excepción de dos de ellos, los demás se incluyen en circuitos integrados que forman cuatro amplificadores operacionales. Los circuitos integrados tienen un tamaño muy reducido, son muy baratos y pueden obtenerse fácilmente, al igual que los diodos, resistencias, condensadores y demás elementos de los circuitos, en las tiendas dedicadas a la venta de componentes electrónicos para radio y televisión. El circuito 741 se ofrece en varias presentaciones físicas, aparte de la de cápsula metálica representada en la figura. La más habitual ahora es una pastilla rectangular de plástico o cerámica con patillas para la conexión. El tipo 747 contiene dos amplificadores 741 en la misma pastilla. Junto con los circuitos concretos que vayan a utilizarse,



Conjunto de la fuente de alimentación

obténganse las indicaciones de la forma en que están conectados los amplificadores a las patillas, para poder montarlos correctamente en el esquema.

Los circuitos electrónicos deben construirse y probarse por separado. Móntese, en primer lugar la fuente de alimentación regulada.

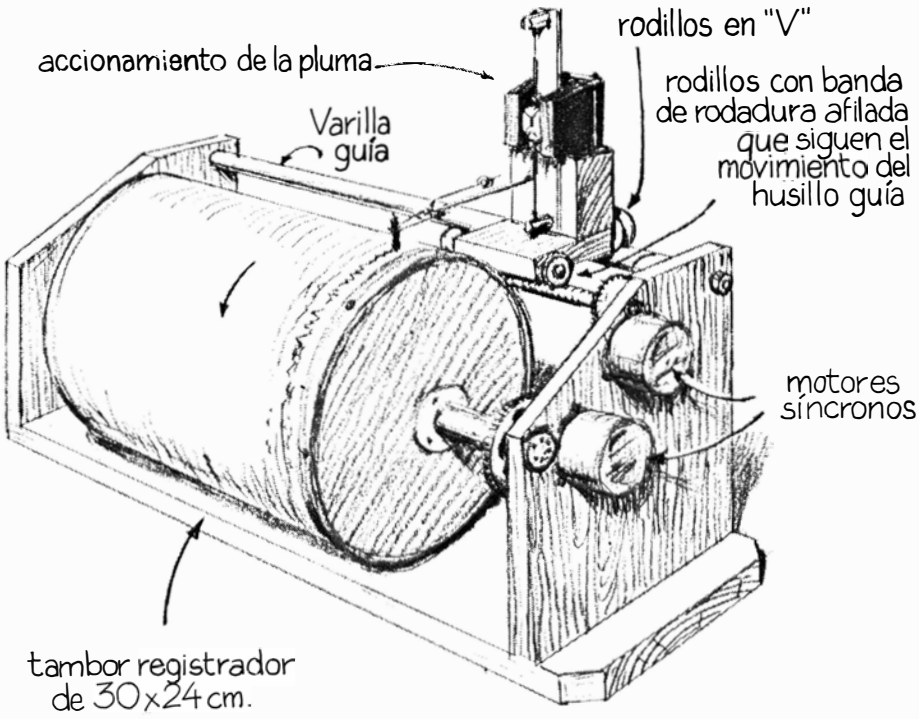
No olvidar los fusibles. La tensión de la fuente no debe modificarse en más de un 1 o 2 % cuando se conecte a la salida una resistencia de 30 ohmios. La resistencia habrá de ser capaz de disipar alrededor de 30 vatios.

Constrúyase a continuación el amplificador de potencia. Comprobar minuciosamente un par de veces por los menos que el cableado reproduce fielmente el esquema (*véase página precedente*). Quitar uno de los fusibles, conectar el circuito a la fuente de alimentación y, con un voltímetro, ajustar el potenciómetro de polarización para obtener a la salida una tensión de 0,5 V respecto a masa. Volver a colocar el fusible y ajustar del mismo modo la polarización del circuito complementario.

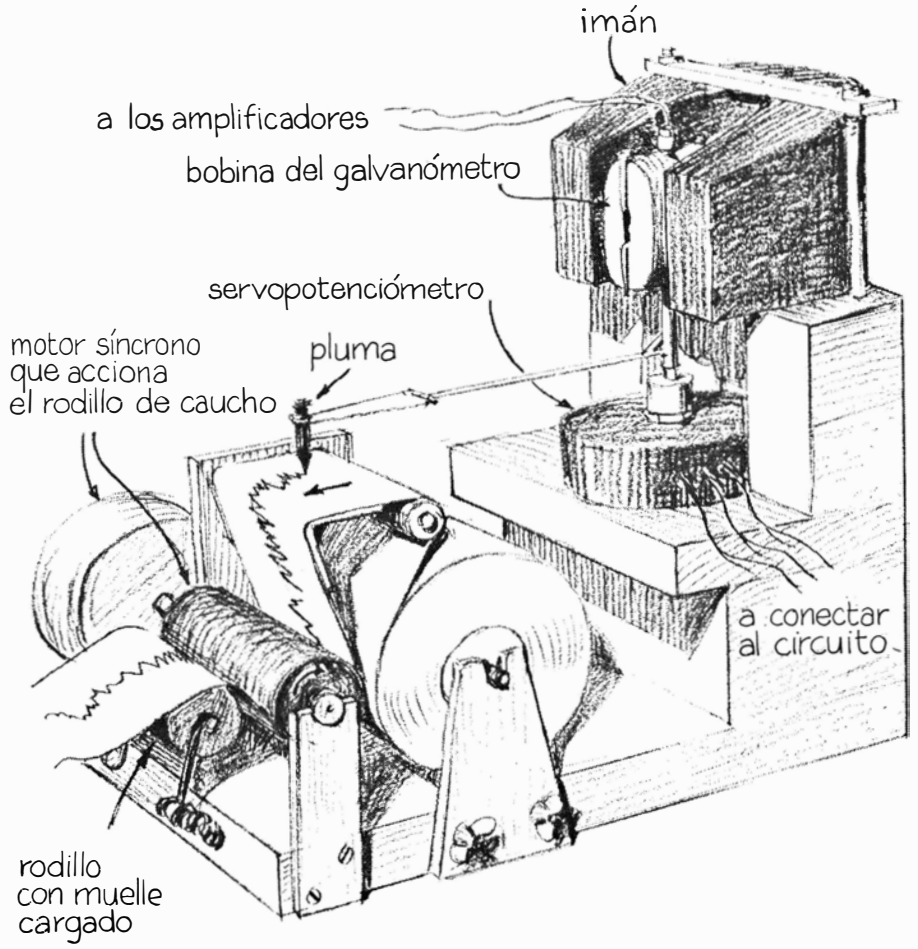
Hacer un ensayo de funcionamiento de amplificador conectando la salida a una carga de prueba y aplicando potencia. Yo utilizo como carga un pequeño motor de corriente continua cuya tensión nominal es de 30 V. Conectar un potenciómetro de 5000 ohmios a la fuente de alimentación y conectar el cursor del potenciómetro a la entrada del amplificador. Si el amplificador funciona adecuadamente, la velocidad del motor y su sentido de rotación pueden controlarse girando el eje del potenciómetro. Por cierto, los transistores de potencia tanto de la fuente como del amplificador de potencia deben montarse sobre asientos con grandes aletas para refrigeración. Sin radiadores adecuados, los transistores de potencia se quemarían rápidamente.

Por último, móntense los circuitos de los amplificadores diferencial y sumador. No aplicar tensión a esta unidad hasta no haber comprobado por tres veces que su cableado corresponde al esquema del circuito. El no hacerlo puede costarle a usted los amplificadores, como yo he aprendido por triste experiencia.

Pruebe los amplificadores conectando un voltímetro a la salida y aplicando tensión a la entrada por medio de un po-



El tambor registrador



Registrador sobre cinta de papel

tenciómetro cableado como divisor de tensión. Después de completar los ensayos, conéctese la salida del amplificador sumador a la entrada del amplificador de potencia, así como el motor de la pluma a la salida del amplificador de potencia y el cursor del potenciómetro de realimentación al terminal de ajuste de fase del amplificador diferencial. Poner todos los potenciómetros en su posición media, excepto los de polarización, que ya fueron ajustados previamente. Todos los terminales de tierra del sistema deben interconectarse, incluso el de la fuente de alimentación.

Aplicar tensión al sistema. Operar el potenciómetro de ajuste de cero, que suministra la tensión de referencia. Si la pluma no puede centrarse sobre el papel operando este control, es probable que la polaridad del potenciómetro esté invertida. Intercambiar las conexiones del potenciómetro con la fuente de alimentación. Centrar la pluma. Estando aplicada la tensión, separar la pluma de la posición cero con el dedo y soltarla. La pluma deberá volver rápidamente a la posición cero y detenerse sin sobreoscilación. Si no vuelve con prontitud, aumentar la ganancia del lazo hasta un valor para el que la pluma oscile, y reducir luego ligeramente la ganancia. Desviar súbitamente la pluma. Deberá moverse unas cuantas veces a un lado y otro de la posición cero.

A continuación, muévase el potenciómetro de ajuste de fase en la dirección que detenga la oscilación. El efecto de este dispositivo es permitir que el sistema prevea lo que va a ocurrir a continuación. Lo que hace es aumentar la ganancia del lazo conforme aumenta la frecuencia de la tensión de realimentación, modificando también las relaciones de fase de las corrientes de la red.

Las posiciones adecuadas de este potenciómetro y del de la ganancia del lazo deben encontrarse experimentalmente. El ajuste correcto puede requerir numerosas repeticiones. Cuando ambos están bien hechos, la pluma volverá a cero y se parará sin oscilación cuando se la aparte de la posición de cero y se la suelte. Este circuito fue montado con los componentes que yo tenía a mano. Los valores de las resistencias se determinaron experimentalmente. Es muy posible que los valores elegidos no sean los óptimos en todos los casos. Sin duda el sistema puede mejorarse con pruebas posteriores.

Los mecanismos de arrastre del papel que yo he construido son de dos tipos Uno de ellos lo hace en forma de cilindro de papel. Empleo esta unidad para re-

gistrar sismogramas. El segundo mecanismo hace deslizarse bajo la pluma una cinta de máquina sumadora. Lo uso, sobre todo, para registrar señales transitorias de mayor frecuencia, tales como los potenciales bioeléctricos. Ambas unidades pueden fabricarse con herramientas ordinarias de mano.

El tambor que soporta el papel cilíndrico se construyó a partir de un tubo fenólico de la clase empleada para montajes telescópicos. Los extremos se cerraron con madera contrachapada. El eje sobre el que gira el tambor debe centrarse con cuanta precisión sea posible, y, aún así, la pluma articulada no describirá circunferencias perfectas. El papel debe pegarse al tambor con cinta adhesiva.

El husillo que hace avanzar el carro del motor a través del tambor es un perno recto que puede encontrarse en muchas ferreterías. El tambor y el husillo pueden girar independientemente, accionándose mediante motores síncronos, o por medio de correas o piñones según los deseos del propio experimentador.

Para registrar terremotos yo prefiero motores síncronos *(véase la ilustración superior de la página anterior).*

El mecanismo de arrastre del papel de máquina sumadora es algo más pequeño que el dispositivo de tambor y más fácil de fabricar. El soporte sobre el que se escribe consiste en una chapa de acero doblada en ángulo agudo y soldada por un lado a una placa vertical unida a la base *(véase la ilustración inferior de la página anterior).* El papel se arrastra sobre el soporte por medio de un rodillo de goma. El rodillo se fabrica con tubo de caucho de pared dura montado sobre un eje.

Un rodillo con un resorte cargado, hecho también de tubo de caucho, aumenta el rozamiento entre el papel y el rodillo motriz.

Es normal que al experimentador le interese temporizar la señal registrada. Yo lo consigo accionando el mecanismo de arrastre del papel con un motor síncrono, una disposición que automáticamente da al grafo una base de tiempo conocida. El experimentador puede montar un motor de velocidad variable y registrar marcas de tiempo junto con la señal.

Esta operación puede llevarse a la práctica introduciendo señales de tiempo en un terminal de entrada de un amplificador sumador y la señal a registrar en el segundo terminal de entrada. Las señales así combinadas se introducen luego a la entrada del registrador.

Taller y laboratorio

Construcción de un microscopio simple de Anton Leeuwenhoek

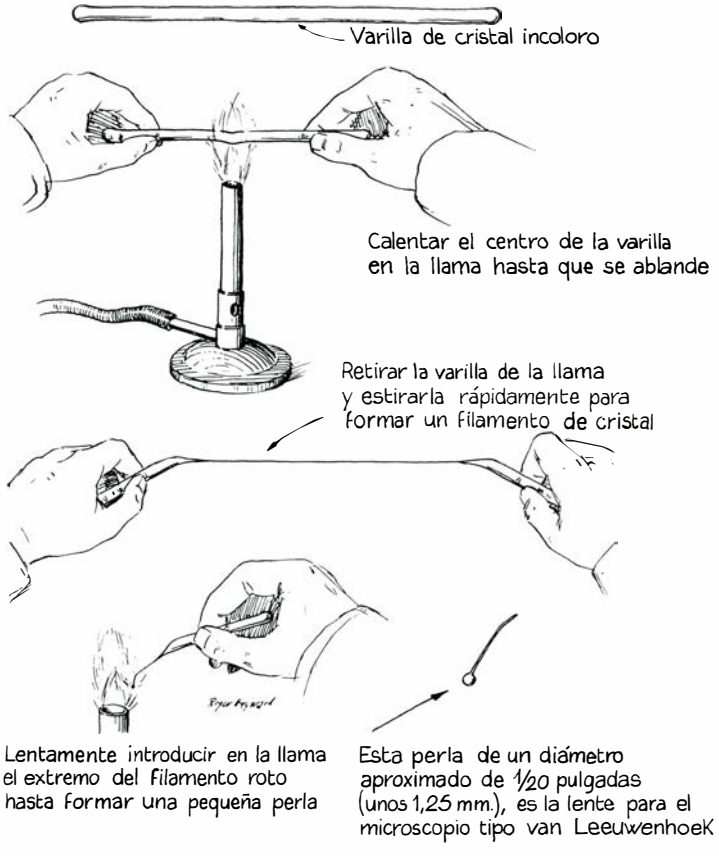
C. L. Stong

La falta de visión de Adán, cuando dio nombre a las criaturas de la tierra (*Génesis,* 2:19), puso las cosas realmente difíciles para sus descendientes científicos. Si hubiera hecho una lista de los animales según los nombraba, ¡cuán fácil sería ahora, por ejemplo, clasificar una preparación para microscopía! Tal como están las cosas, el redescubrimiento y nueva denominación de los organismos del mundo ha supuesto una lenta y penosa labor. Aristóteles conocía unos 520 animales y Teofrasto podía identificar aproximadamente otras tantas plantas. Hoy en día, gracias principalmente a Linneo y a la invención del microscopio, nuestro catálogo ha aumentado hasta cerca de un millón de especies animales y 336.000 especies de plantas. Sin embargo, el censo de la vida sobre la tierra está lejos de ser completo; nadie sabe cuántos miles de especies quedan por descubrir y clasificar.

La búsqueda para completar y ordenar la colección de organismos constituye uno de los desafíos más agradecidos de la ciencia. Y para los aficionados a ésta, se trata de un deporte apasionante. Se puede participar con solo adquirir un microscopio, ya que la zona más extensa por explorar está ocupada por los microorganismos.

La microscopía presenta para el aficionado otros atractivos además del hallazgo de nuevos organismos.

Puede construirse en casa un microscopio útil, en menos de una hora, sin tener que desplazarse mucho para encontrar material de estudio. La saliva, por ejemplo, proporciona suficiente variedad de muestras a estudiar durante meses. Parece como si cuantos más organismos hallamos e identificamos, más quedan por descubrir. El problema de la miscroscopía no es tanto encontrar materia de estudio cuanto desarrollar la voluntad de querer dedicarse a una cosa concreta. Constantemente nos vemos tentados a explorar los nuevos campos que nos abre el instrumento. Supongamos que alguien derrama la sal y que sus cristales le llaman la atención. Uno empieza a pensar en la cristalografía. Basta con ir hasta la cocina para encontrar material más que suficiente para mantener su microscopio ocupado durante horas, examinando la morfología cúbica de la sal o la estructura brillante del azúcar. Una partícula de polvo, extraída de la punta de los zapatos, proporciona una amplia colección de minerales cristalinos: cuarzo, mica, sílice, calcita. Fragméntese un cubito de hielo en el vaso, póngase una lámina sobre el portaobjetos y obsérvese rápidamente. Los cristales aciculares se convierten casi instantáneamente en una esfera reluciente. Comprobar la pureza de la gota de agua resultante. ¿Contiene



Construcción de una lente de perla de un microscopio de Leeuwenhoek

partículas de materia en suspensión o quizá organismos en estado latente? Examinar unos pocos granos de pimienta, ¿ha sido adulterada, como a veces ocurre, mediante la adición de almidón? Si así es, se identificarán en seguida los granos de forma ovalada. ¿Se está interesado en las grasas? Contrastar el aspecto de una mancha de mantequilla con un poco de grasa de carne cocida. El interés inicial por los cristales puede ampliarse en cuestión de minutos.

Los historiadores no están seguros de quién inventó el microscopio. Como muchos productos de la tecnología, parece ser que el instrumento ha evolucionado a partir de diversos conocimientos acumulados, muy entrelazados y difíciles de aislar.

La lupa más antigua de las descubiertas hasta ahora fue encontrada en las ruinas de Nínive por el arqueólogo británico Sir Austen Layard. Era una lente planoconvexa de cristal de roca toscamente pulida, que aumentaba bastante bien. Plinio el Viejo, en el año 100 p.C., citó la "propiedad de quemar que tenían las lentes hechas de cristal". Pero la ciencia de la óptica, según se entiende modernamente, no se inició hasta el siglo XIII, aproximadamente.

Roger Bacon parece haber sido el primero en sugerir sus principios. Sus escritos serían el fundamento del microscopio y del telescopio, y, probablemente, se le puede otorgar la invención de las gafas.

Bacon enseñó la teoría de las lentes a un amigo, Heinrich Goethals, el cual visitó Florencia en 1285. La información de Goethals pasó a un tal Salvina D'Armato a través de un fraile dominico, Spina. La tumba de D'Armato en la iglesia de Sta. Maria Maggiore lleva la siguiente inscripción: "Aquí yace Salvina D'Armato de los Amati de Florencia, inventor de las gafas. El Señor perdone sus pecados. A.D. 1317".

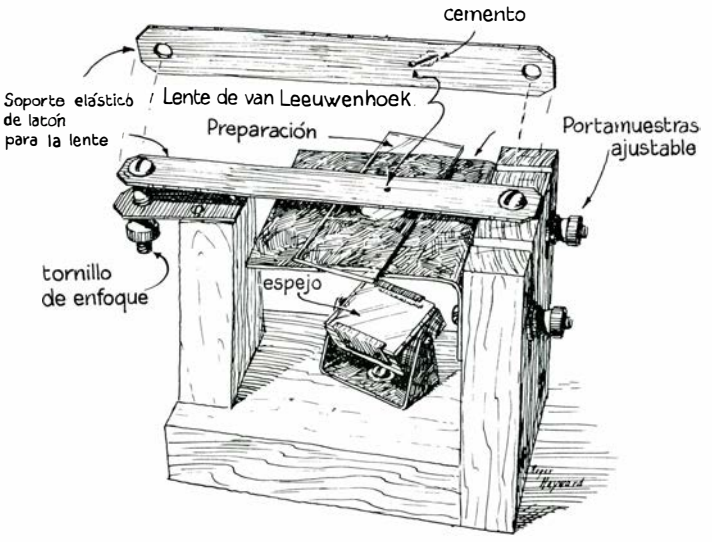
El microscopio simple –de una sola lente– debió usarse tan pronto como se inventaron las gafas, e incluso pudo precederles. No se sabe quien fue el primero en utilizarlo. Sin embargo, el primero que se sirvió de él para algunos descubrimientos importantes fue el holandés Anton van Leeuwenhoek, nacido en 1632. Tras examinar algunos materiales corrientes con un instrumento simple de lente única, que él mismo había construido, escribió emocionado a la Royal Society de Londres acerca de todos los increíbles objetos que revelaba.

Descubrió "organismos culebreantes" y "gusanos" en el agua tomada del canal de su Delft natal y en raspados de sus dientes. Tal vez su contribución más importante fue la observación de los glóbulos rojos de la sangre. Leeuwenhoek no sólo identificó los eritrocitos sino que también realizó dibujos precisos de su forma enviándolos, junto con las mediciones de su tamaño, a la Royal Society.

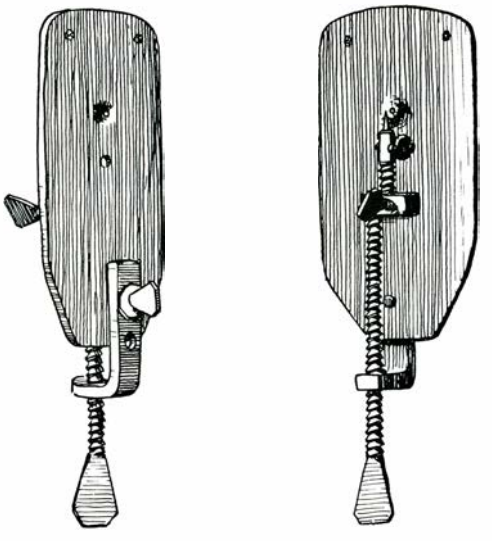
Cualquiera, con un poco de tiempo libre, puede construirse un microscopio de Leeuwenhoek. Su ejecución es fácil y confiere al principiante una valiosa experiencia en la preparación y manejo de los especímenes.

Se necesita una varilla de cristal, corta, y delgada; un trozo de hierro o latón de 2,5 × 7,5 cm y de 1,5 mm de espesor, aproximadamente; dos tornillos para metales, con las correspondientes tuercas; un tubo de cemento de secado rápido y un poco de celofán.

En cuanto a la varilla de cristal, bastará una de vidrio incoloro y transparente, de las utilizadas para agitar líqui-



Microscopio de Leeuwenhoek adaptado a los modernos portaobjetos



Un microscopio de Leeuwenhoek

dos en los laboratorios. Se pasa el centro de la varilla por la llama de un mechero Bunsen o de un fogón de la cocina. La varilla se introduce gradualmente en la llama para evitar las fuerzas creadas al calentarla bruscamente, que causarían su rotura. El centro de la varilla alcanza rápidamente el rojo vivo y se torna maleable.

Retirar rápidamente la varilla del fuego y estirarla. Su centro ablandado dará lugar, al estirar, a un filamento a modo de cabello de unos 60 cm de longitud.

Una vez enfriada la varilla, se rompe un fragmento, de unos quince centímetros, de la parte media del filamento. Paulatinamente se va poniendo en contacto un extremo de este hilo con la llama. Su extremo se volverá incandescente casi en el acto, formándose una pequeña perla. Seguir introduciendo el filamento en la llama hasta que la perla alcance un diámetro aproximado de unos 1,5 mm.

La lente del microscopio ya está terminada. La pequeña perla, si se ha preparado cuidadosamente, tendrá aproximadamente un aumento de 160 diámetros. (El aumento de una lente de este tipo viene a ser igual al número 10 dividido por el diámetro de la perla expresado en fracciones de milímetro.) La calidad de las lentes fabricadas por este método primitivo está lejos de ser uniforme; por consiguiente, deben hacerse varias y seleccionar la mejor.

Unido a la perla, puede dejarse un segmento del filamento de cristal, utilizándolo luego para montar la lente en su soporte. Leeuwenhoek montó su lente entre dos placas de latón con un orificio para aquélla. Pero a mí me ha resultado más conveniente perforar una sola placa y pegar a ella la pieza de cristal por su vástago, con la perla ocluyendo el agujero. El agujero debe ser ligeramente menor que la perla, con el fin de que no se escape la luz por los lados de la lente, cosa que disminuiría el contraste de la imagen. El cristal se fija a la placa con cemento de secado rápido.

La distancia focal de esta lente minúscula es muy corta. Esto significa que el portaobjetos sobre el que se monte el espécimen debe hallarse muy cerca de la lente, a veces casi tocándolo. Para enfocar el microscopio y situar la muestra en la posición correcta, Leeuwenhoek se sirvió de un conjunto de tornillos que movían una punta de metal, la cual servía de portaobjetos. En mi versión de su instrumento, he sustituido la punta metálica por un trozo de celofán y lo he pegado con cemento al mecanismo de ajuste. Las muestras se engloban en el celofán.

Por desgracia, el microscopio de Leeuwenhoek carece de la comodidad de observación de los instrumentos modernos. Para ver la imagen aumentada hay que acercar mucho la lente a la vista. Roger Hayward diseñó un modelo mayor, empleando un portaobjetos clásico como portamuestras, un espejo para controlar la luz y un control del enfoque más práctico. Estas modificaciones mejoran la comodidad del instrumento, pero no eliminan la necesidad de acercar la lente al ojo.

Teniendo en cuenta su primitivo diseño, el microscopio de Leeuwenhoek revela una asombrosa cantidad de detalles. Se supone que Leeuwenhoek trabajó con éxito con perlas más pequeñas, que daban mayores aumentos, pero rápidamente aprendió a valorar más la resolución que el poder magnificador, y a trabajar con el aumento más bajo posible. Una imagen grande, pero borrosa, no ofrece ninguna ventaja sobre otra pequeña y también borrosa.

Leeuwenhoek, dictó, por lo menos, otra lección fundamental, a saber: la importancia de preparar cuidadosamente los objetos para su examen microscópico. Como escribiera, en el siglo XVIII, el matemático Robert Smith en su *Compleat System of Optiks* "tampoco debemos olvidar una habilidad en la que él (Leeuwenhoek) sobresalió muy particularmente, la de preparar sus muestras de la mejor manera para ser observadas con el microscopio; y estoy seguro que cualquiera que examine algunas de estas mismas muestras a través de estas lentes, quedará satisfecho. Por lo menos yo mismo he encontrado mucha dificultad a este respecto, observando una diferencia muy apreciable entre los detalles de la misma muestra preparada por mí y la preparada por el Sr. Leeuwenhoek, observada con lentes de calidad muy parecida".

Desde la época de Smith, generaciones enteras de fabricantes de portaobjetos han desarrollado técnicas para la preparación de muestras, tan fascinantes casi como el manejo del propio microscopio.

Algunas muestras bastante notables, como la raíz seca de un cabello, o la pulga muerta de un perro, no requieren otra preparación que la de colocarlas sobre un portaobjetos con una pizca de bálsamo del Canadá, o algún otro englobante para preparaciones, y cubrirlas con un delgado cristal. Los objetos diminutos, como los glóbulos rojos de la sangre, pueden verse bastante bien, si se extienden con cuidado sobre un portaobjetos y se protegen con un cubreobjetos. Pero los gruesos y opacos, o transparentes, o los que contienen agua en su estructura, requieren un tratamiento especial.

Si hay que estudiar el interior de una muestra, debe cortarse o, si es transparente, hay que iluminarla por debajo. Algunas muestras deben cortarse en secciones muy finas. Hay aparatos para cortar llamados microtomos, que pueden cortar tejido congelado o tejido incluido en cera, en secciones casi tan finas como la longitud de las ondas luminosas. Además de resolver el problema de la iluminación, los cortes finos simplifican la imagen, ya que el microscopio aumenta en todas direcciones. No se necesita ninguna máquina especial para cortar. Una hoja de afeitar sirve para muchos tipos de muestras.

Cuando un organismo es completamente transparente, a veces debe colorearse o colocarse dentro de una substancia refractora de la luz. El proceso de tinción es un arte en sí mismo, pues ésta produce siempre una mutación química en el organismo. Algunos colorantes afectan a una parte de la célula, pero no a otras. Utilizando diferentes productos químicos se puede teñir el núcleo de un color y el citoplasma que lo rodea de otro.

Muchas bacterias pueden distinguirse unas de otras únicamente por la forma en que captan un determinado colorante; ésta es la base, por ejemplo, de la clasificación de las bacterias en "gram positivas" y "gram negativas".

La preparación de muestras para el microscopio ha dado lugar a su propia literatura especializada, con volúmenes enteros dedicados a temas tales como técnicas de desecación; limpieza; blanqueado para extraer los pigmentos que perturban la visión; métodos de flotación de muestras en células líquidas; selección de cubreobjetos con propiedades ópticas que concuerdan con las del instrumento; y el pulido y corrosión de superficies metálicas para revelar la estructura cristalina. Procesos todos ellos que resultan casi tan numerosos y variados como los objetos que pasan enfocados por la lente del observador.

Después de construir y utilizar un aparato de Leeuwenhoek, es muy probable que uno decida ir más allá. Un microscopio compuesto clásico ahorrará mucho esfuerzo visual. Debe ser un instrumento de buena calidad, capaz de mostrar finos detalles. Sus aumentos han de concordar con la capacidad del principiante. Los objetivos de gran aumento suelen resultar defraudantes para aquél, ya que su buena utilización requiere destreza.

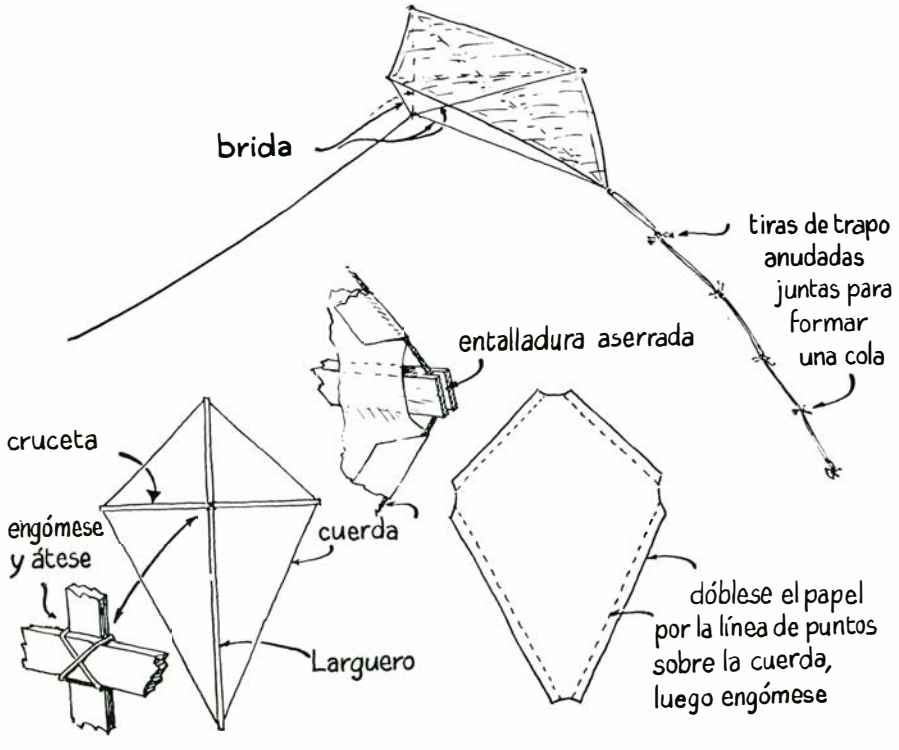
Taller y laboratorio

La ciencia y la aerodinámica de la fabricación y vuelo de las cometas

C. L. Stong

Hace algunos años, dos muchachos se ofrecieron a segarme el césped si yo les ayudaba a construir una cometa que volara. Acepté. La cometa que fabricamos funcionaba tan bién, que ampliamos el contrato a razón de cometa por siega y pasamos un verano memorable descubriendo las delicias del diseño, la construcción y el vuelo de las cometas. Aunque uno de los muchachos se convirtió con el tiempo en flamante ingeniero aeronáutico y el otro en bioquímico, su común entusiasmo por las cometas, así como el mío, continúa.

¿Qué es una buena cometa? La respuesta depende de los gustos e intereses de cada cual. Para los diestros entusiastas de Oriente, donde el deporte de lanzar cometas es anterior a los tiempos históricos, las cometas son de tres clases. La primera categoría comprende las cometas de combate. Un buen modelo resulta tan ágil y vigoroso que puede vencer a todos sus competidores en combate aéreo controlado. La segunda categoría comprende las cometas acrobáticas, que pueden volar en picado, rizar, dibujar un ocho, y así sucesivamente. Los diseños de la tercera categoría afectan primeramente a la sensibilidad del ojo y del oído. La forma de estas cometas va desde el simple contorno del diamante a figuras que representan pájaros, animales y otras figuras de la mitología, como los dragones, que llegan a medir hasta 30 metros de longitud. Las cometas suelen colorearse de forma graciosa, y pueden llevar tubos de bambú u otros instrumentos que emitan sonidos musicales.



Elementos de una cometa en forma de diamante

Las cometas que nosotros construíamos pertenecían a una cuarta categoría: la de las que alcanzan la mayor altura posible para una longitud dada de cuerda o, como diría un ingeniero aeronáutico, cometas cuya relación empuje-arrastre es máxima. Nos divertíamos ensayando nuevos diseños e imaginando misiones para las cometas; verbigracia: medir la temperatura del aire a varios miles de metros de altura y hacer fotografías aéreas. Obtuvimos gran parte de la información que necesitábamos de los archivos de la Oficina de Meteorología de los Estados Unidos, que hubo de utilizar ampliamente las cometas para levantar hasta la atmósfera los instrumentos meteorológicos antes de la aparición de las radiosondas, cohetes y satélites. A comienzos de siglo, la Oficina utilizaba 17 estaciones de cometas a lo largo del país y batió numerosas marcas. Por ejemplo, el 5 de mayo de 1910, la unidad más alta de un tren de 10 cometas de la Oficina de Meteorología transportó una carga de instrumentos meteorológicos a una altura de 7200 m. En conjunto las cometas del tren tenían una superficie de vela de 61,5 metros cuadrados y ejercían una tensión de más de 181 kilogramos fuerza sobre la cuerda de amarre de 14,5 km, hecha de cuerda de piano. El hilo fue largado y recogido mediante un tambor accionado eléctricamente.

Nuestros deseos eran mucho menos ambiciosos. Nuestra primera cometa era muy sencilla, en forma de diamante y compuesta de dos varas cruzadas, cubiertas con papel. Las longitudes del larguero, o vara vertical, y de la cruceta, o vara horizontal, eran de 0,91 y 0,61 metros de longitud, respectivamente. El punto medio de la cruceta cruzaba al larguero a una distancia de 0,3 metros del punto

más alto de éste. Unimos las varas en el punto de cruce con una gota de goma y una cuerda de apriete. Hicimos una entalladura visible de unos 16 mm de profundidad en los extremos de cada vara antes de montarlas (*véase la ilustración de la página anterior*).

Cuando la goma se había secado apretamos la cuerda que previamente habíamos pasado por las entalladuras y engomamos el papel que cubría las cuerdas. Montamos luego, en la cometa, una brida que consistía en un lazo de cuerda atada a los extremos superior e inferior del larguero situados en el lado empapelado de la cometa y en otro lazo a lo largo de la cruceta. La longitud de la brida se ajustó de tal forma que la cuerda quedase tensa cuando los lazos se alejasen 30 cm del papel, hasta un punto colocado sobre la perpendicular de la cruz. La cuerda de amarre se ató provisionalmente a la brida en este punto. El punto en el que la cuerda se unió a la brida determinaba el ángulo con el que el aire golpeaba a la cometa, es decir, el ángulo de ataque.

Las cometas, como el palo mayor de un velero, funcionan mejor con ángulos de ataque comprendidos entre 20º y 25º. A causa de la pronunciada curvatura del papel, este ángulo es mayor que aquel otro con el que el ala de un avión ataca el viento. El ángulo exacto de ataque con el que una cometa funciona mejor depende de la fuerza del viento y debe determinarse experimentalmente. En general, el ángulo debe decrecer cuando crece la velocidad del viento. El cambio se realiza desplazando la cuerda de amarre hacia la parte superior de la cometa.

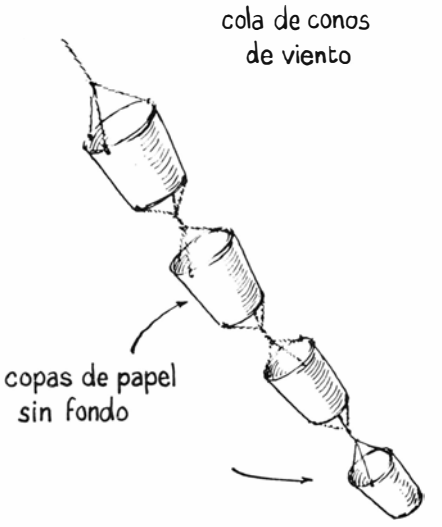
Las cometas con forma de diamante son intrínsecamente inestables, por lo que se les debe acoplar una cola para mantenerlas derechas. El peso de la cola presta parte de la fuerza de estabilización: otra parte, la fricción entre la cola y el aire en movimiento y, otra tercera parte, la turbulencia generada en la corriente de aire por la cola. Las últimas dos fuerzas se denominan de arrastre. Para que la cometa pueda volar, las fuerzas con sentido descendente deben ser inferiores al empuje que desarrolla el flujo de aire, bajo y sobre la cubierta de papel. La cola proporciona estabilidad, si bien a costa del empuje. Las necesidades de estabilidad aumentan con la velocidad del viento. Una cometa que vuele plácidamente con una cola corta en una brisa ligera girará sin control en un viento fuerte. Incluso una cometa con una cola larga y que vuele bien en un viento fuerte puede no volar en una brisa ligera.

Una solución para este problema es dotar a la cometa de una cola consistente en una serie de conos de viento (*véase la ilustración de esta página*). Estos conos puede fabricarse quitándole el fondo a ciertos recipientes de papel, como las copas o los cartuchos de un helado. La fuerza desarrollada por el aire que fluye a través de los conos aumenta con la velocidad del viento y proporciona una estabilidad óptima dentro de un amplio intervalo de velocidades del viento. Las cometas con largas colas de esta clase vuelan considerablemente más alto que las que poseen colas hechas de tiras de tela o papel atadas a intervalos a lo largo de la cuerda.

La forma de la cometa de diamante puede modificarse fácilmente. Por ejemplo, tres varas de la misma longitud pueden cruzarse para formar un hexágono. Otra, de forma circular, puede obtenerse doblando el bambú en círculo. Pueden hacerse combinaciones de varas rectas y de bambú para obtener figuras de pájaros. Todas estas formas vuelan casi con idéntica perfección si se las equipa con una cola de estabilización apropiada. En Oriente, a menudo se realizan diseños complejos, apilando cometas unas detrás y muy cerca de otras. Las cometas se atan entre sí por cuerdas que unen los ángulos de una cometa a los ángulos comparables de las que le suceden. La brida se monta en la primera cometa de la serie. Los miembros sucesivos de la serie funcionan, a la vez, como cometas y como cola de estabilización.

Para lanzar una cometa de cualquier clase, se coge la cuerda de amarre con una mano y el extremo inferior de la cometa en la otra. Se inclina la cometa de manera que forme un ángulo de unos 25º con el viento, con el lado empapelado enfrentando a éste, y se suelta. A medida que la cometa se vaya elevando, se libera la cuerda de amarre a una velocidad que permita a la cometa mantener su ascenso. Si son dos las personas que tratan de hacerla volar, una deberá sostener la cometa mientras que la otra tendrá que soltar un metro y medio de cuerda. Cuando la cuerda se tense suficientemente se lanzará, inclinada, al aire.

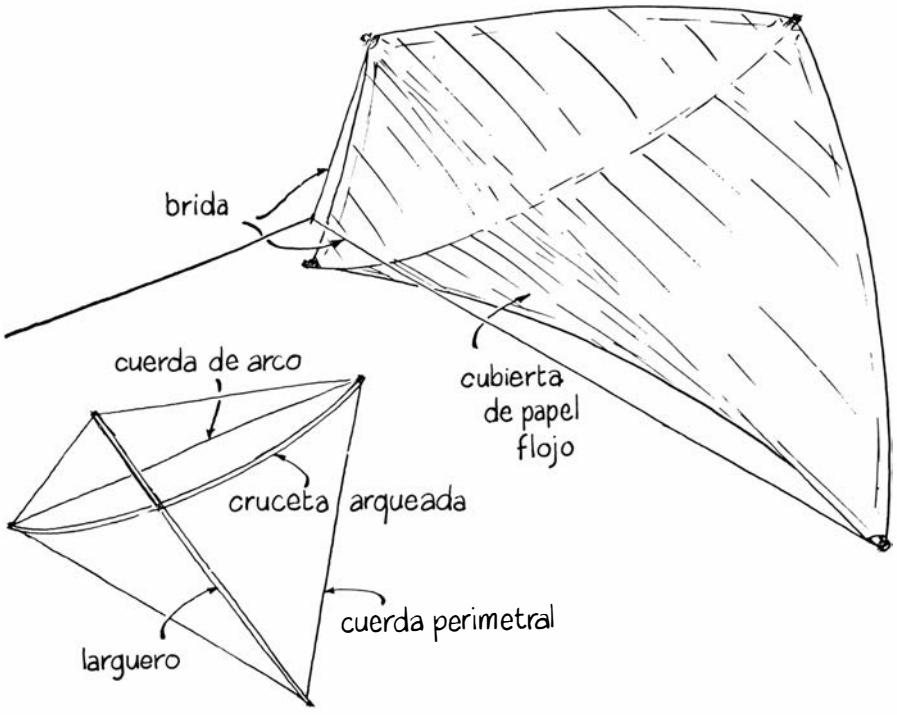
Los materiales para fabricar una cometa se obtienen fácilmente, Nuestras varas procedían principalmente de un almacén local de maderas. Seleccionábamos abeto de fibra recta, sin nudos, de 1,91 cm de espesor, 15,24 cm de ancho y 1,83 metros de largo: lo pedíamos cortado en tiras de 4,76 mm a 6,36 mm de ancho. También hacíamos armazones de cometas partiendo de las existencias de pasadores de madera de 6,35 mm de diámetro. Estos pasadores son más pesados que el abeto, se doblan con mayor facilidad y cuesta más unirlos que las varas planas, pero, en cambio, se encuentran ya fabricados en muchos establecimientos de ferretería.



Cola de conos de viento

Usábamos cuerdas de amarre de nylón. La tensión de rotura del nylón es mayor, en proporción a su peso y espesor, y produce menos arrastre en el viento que otras cuerdas que probamos, particularmente la cuerda peluda de algodón conocida como cuerda de carnicero. No se debe usar, como cuerda de arrastre, cuerdas de piano o cualquier otro material que sea conductor de electricidad. Algunos lanzadores de cometas cayeron electrocutados por "cuerdas" conductoras de electricidad, que entraron accidentalmente en contacto con líneas de alta tensión. No hay que lanzar nunca una cometa con una cuerda mojada, ni intentar reproducir el experimento de Benjamín Franklin de atraer el "fuego eléctrico" de una tormenta. Franklin tuvo suerte. A un científico europeo, que siguió sus instrucciones para llevar a cabo el experimento, lo mató un rayo que descendió por la cuerda húmeda.

Las cometas de hasta 1,20 metros de diámetro pueden cubrirse con el mismo papel de periódico. La seda ligera, tejida tupidamente, es mejor, más fuerte y desarrolla menos arrastre, pero resulta más cara.

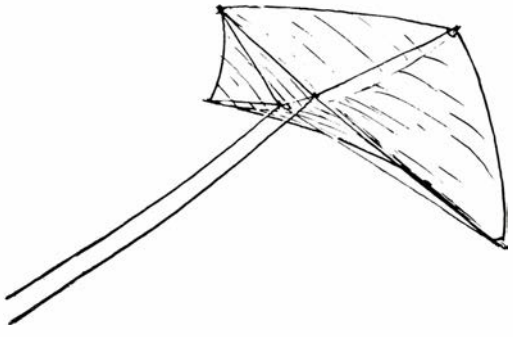


Configuración de una cometa malaya

El material más fuerte y de más rendimiento aerodinámico son las hojas de plástico resistentes; como las que emplean los agricultores para proteger el grano y la paja de la intemperie.

En seguida nos decidimos a fabricar y lanzar cometas malayas. Son, básicamente, cometas con forma de diamante que se estabilizan por su forma y, por tanto, no necesitan cola. Vuelan mucho más alto que las cometas con cola y son fácilmente manejables. La estabilidad se consigue doblando la cruceta hacia atrás con una cuerda de arco *(véase la ilustración superior).* La estabilidad aumenta con la profundidad del arco. En el caso de una cruceta de 60 cm de longitud, el arco tiene una profundidad típica de unos 10 cm. Cuando la cometa afronta perpendicularmente al viento, la fuerza de éste actúa de la misma manera sobre los lados derecho e izquierdo de la superficie. Las fuerzas se desequilibran cuando un soplo de viento gira la cometa de tal forma que un lado presenta al viento más superficie que el otro. El lado que mira al viento sufre una fuerza mayor que hace girar la cometa hasta restablecer el equilibrio. Las alas de los aviones se unen de forma similar para formar una ligera V, conocida como ángulo diedro, que proporciona estabilidad lateral. También en este caso se gana estabilidad a costa del impulso. Las cometas malayas de arco mínimo vuelan más altas que las de arco máximo, pero tienden a picar hacia atrás y hacia adelante, a rizar y girar. Las cometas de máximo arco vuelan con estabilidad, aunque a menor altura. El papel que cubre estas cometas debe estar distendido, como las velas de los barcos, de forma que el viento pueda doblar su superficie hasta constituir una curva uniforme. Una cometa malaya lleva una brida de una sola cuerda, que tiene que atarse al larguero.

Dotando a la cometa malaya de dos o más cuerdas de amarre y una brida cruzada, la forma de vuelo puede controlarse desde el suelo. A las partes superior e inferior del larguero se atan dos bridas de igual longitud, y una tercera cuerda se ata a los extremos de la cruceta. Las cuerdas verticales se separan a izquierda y derecha y se atan simétricamente a la cuerda horizontal (*véase la ilustración inferior de la izquierda).* Las cuerdas de amarre se unen a los puntos de cruce de la cuerda horizontal y de la vertical de la brida. Durante el vuelo, la cometa derivará oblicuamente hacia la cuerda más tensa a una velocidad creciente con la intensidad de dicha tensión. En el límite de su deriva lateral, la cometa dará la vuelta, picará e invertirá su dirección lateral. La maniobra hará que se enrosquen las dos cuerdas de amarre. Pueden desenroscarse tirando de la cuerda floja, lo que hará que la cometa repita la misma maniobra al revés. El arte de hacer efectuar a la cometa otros vuelos acrobáticos puede aprenderse con la práctica.



brida de cuerda doble
para maniobrar una
cometa malaya

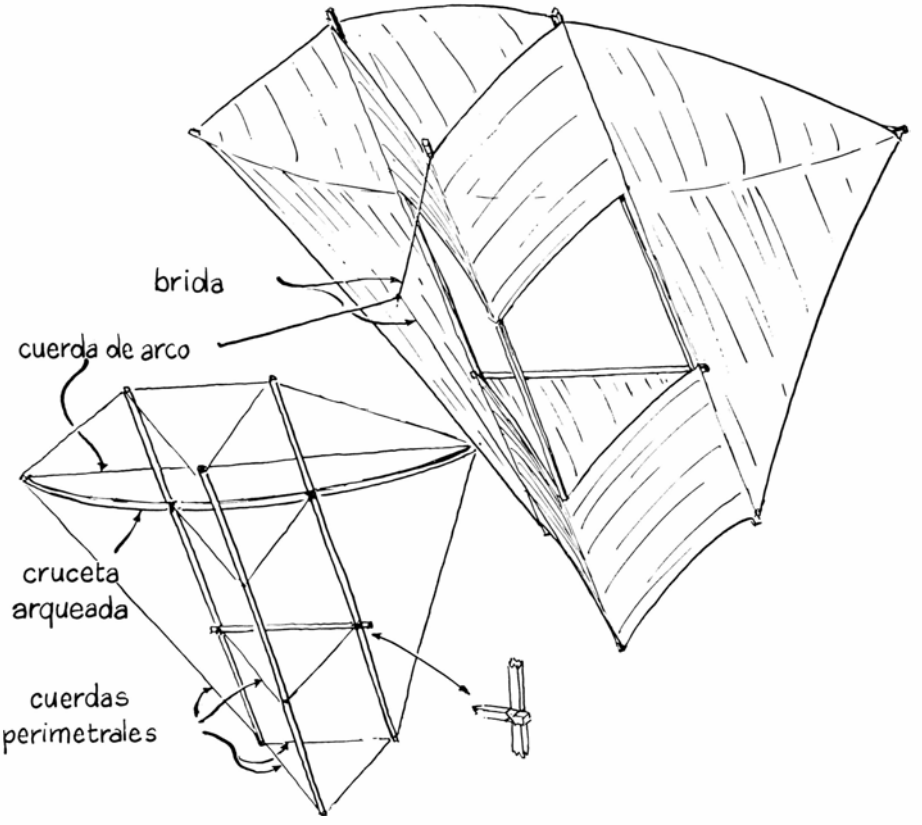
Control de una cometa malaya

Para levantar una carga (un termómetro, un barómetro o una cámara) preferimos una cometa francesa de guerra, que es una cometa en forma de caja triangular con un par de alas triangulares (*véase la ilustración de la parte superior de la página opuesta*). La estructura se compone de cinco varas. En un diseño de tamaño modesto, cuatro de ellas pueden medir 914 mm de longitud y, la quinta, 355 mm. Dos de las varas largas se emplean como largueros verticales, separados 30 cm. La cruceta atraviesa los largueros a una distancia de 30 cm, medidos desde la parte superior de éstos. La vara corta se coloca paralela a la cruceta y a 30 cm por debajo de ella. Todos los cruces se pegan y atan con una cuerda. La estruc-

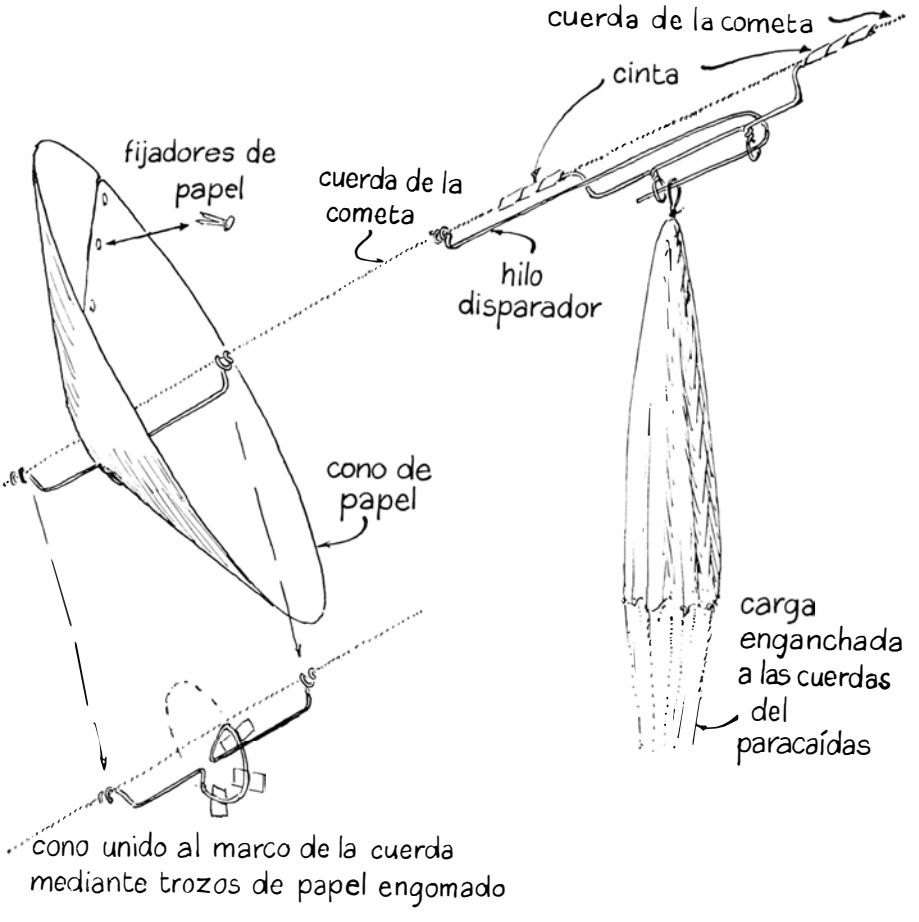
tura completa se cubre con papel, como se hacía en el caso de la cometa hexagonal. Después se corta diagonalmente el cuadrado de papel situado en el centro y limitado por los largueros, la cruceta y la vara corta. Las faldillas de papel resultantes se pliegan sobre las maderas adyacentes y se pegan en el lugar sobre el que se abaten. La estructura es ahora la de una cometa hexagonal con un hueco cuadrado en el centro. La sección de caja triangular se hace dotando a los bordes de dos cintas de papel, provistas de cuerdas perimetrales. Se introducen parcialmente cuatro clavos en la mesa de un banco de trabajo, de modo que delimiten un rectángulo de 30 cm de ancho y 90 cm de largo. Se pasa y se tensa una cuerda perimetral en torno a los cuatro clavos y se atan los extremos entre sí. Se cortan dos tiras de papel de 35,5 cm de ancho y 66 cm de largo. Se desliza una de las tiras bajo el lazo rectangular formado por esta cuerda perimetral y se centra en relación con los clavos. Se dobla 2,5 cm de papel sobre la cuerda, a los lados, y se pegan sobre ese lugar. Se corta el largo de cuerda en los extremos a mitad de camino entre los clavos. Los lados de la tira de papel quedan ahora reforzados con las cuerdas, cuyos extremos se extienden desde los cuatro ángulos de la tira.

Se cortan 2,5 cm de papel, próximo a la cuerda, en los cuatro ángulos y se dobla el extremo hacia arriba en faldillas de 2,5 cm. Se prepara la segunda tira del mismo modo. Para montar las tiras sobre el cuerpo de la cometa, se abren cuatro pequeños agujeros en el papel del cuerpo en el extremo exterior de los largueros y donde éstos cortan a la cruceta y a la vara corta. Se pasan las cuerdas de la tira de papel a través de los huecos y se las ata fuertemente a los largueros. Hay que pegar luego las faldillas de 2,5 cm de las tiras al cuerpo de la cubierta. Finalmente, se desliza el larguero restante dentro de las bandas de papel; se centra y se pega a las tiras de papel. El centrado resulta fácil si las tiras de papel han sido marcadas con un pliegue en ángulo recto en su mitad. La cometa puede suspenderse boca abajo por cuerdas unidas a los extremos del larguero central, mientras se seca la goma.

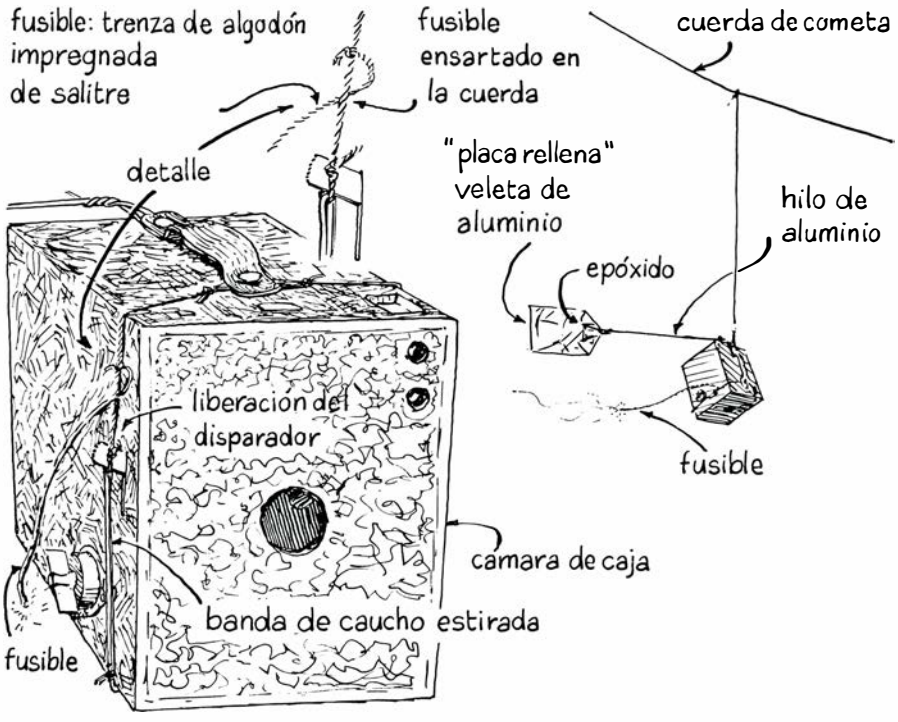
Inmediatamente antes de lanzar la cometa, la cruceta se arquea y se sujeta en esta posición con una cuerda de arco, como se hacía en el caso de la cometa malaya. La brida se une al centro del larguero de la sección triangular. Cuando una cometa francesa de guerra de estas dimensiones se lanza, con un viento de 24 kiló-



Cometa francesa de guerra



Mecanismo para soltar una carga



Fusible para liberar el disparador de la cámara

metros por hora, puede elevar una carga de unos 57 gramos por cada 9 dm² de área de vela y ejercer, en la cuerda de amarre, una tensión de unos 50 gramos por decímetro cuadrado.

La intensidad del empuje que desarrolla una cometa en relación a la fuerza de arrastre que tiende a empujarla hacia abajo en la corriente de viento –la relación empuje-arrastre– aumenta dentro de ciertos límites, ya que la anchura de la cometa aumenta en relación a su longitud, proporción que se conoce con el nombre de factor de forma. El factor de forma de las alas de un avión suele ser de 7 a 1; las alas son largas y estrechas. La cometa de guerra francesa puede considerarse como una cometa en forma de caja triangular con alas triangulares, con un factor de forma comparativamente bajo. El factor de forma puede aumentarse empleando una cruceta de mayor longitud que los largueros. Ello mejora la relación empuje-arrastre. La modificación, si se lleva al extremo, da lugar a inestabilidad y a debilidad estructural, a no ser que la cruceta se haga en forma de entramado. Nos divertíamos mucho construyendo cometas de variadas proporciones y observando su funcionamiento. Para alcanzar la altura máxima, lanzábamos la cometa y largábamos tanta cuerda de amarre cuanta pudiera soportar. Cuando aparecía una comba pronunciada en la cuerda de amarre, atábamos una segunda cometa y la dejábamos ascender hasta que la cuerda de amarre quedase floja de nuevo. Una tercera cometa se ataba luego, y así sucesivamente. El número de cometas que pueden formar el tren queda limitado solamente por la resistencia de la cuerda de amarre. Ocasionalmente, la cometa superior del tren puede quedar atrapada en una corriente ascendente y empujada dentro de un viento que sople en una dirección que difiera del viento de la superficie. El tren completo es transportado, entonces, hacia arriba. En una ocasión, la cometa más alta de uno de nuestros trenes alcanzó una altitud superior a los 1600 metros. La cuerda se movió en espiral hacia abajo, de manera que la cometa superior estaba directamente sobre nuestras cabezas y permaneció allí alrededor de una hora.

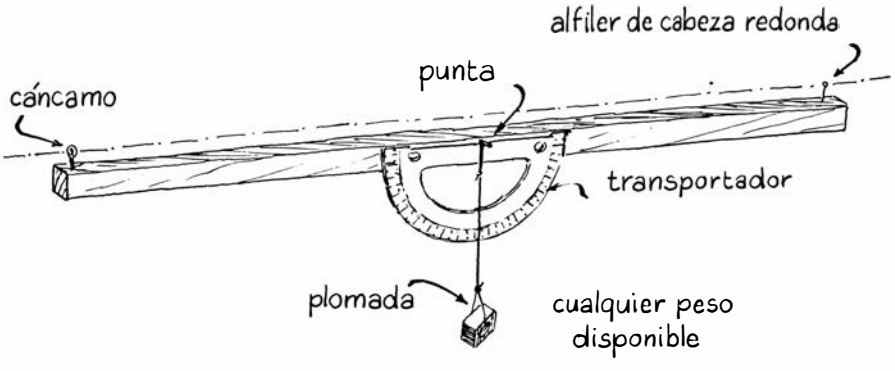
Adaptamos a las cometas diversas cargas que podían dejarse caer en paracaídas o ser manipuladas de otro modo. Por ejemplo, puede atarse a la cometa un paracaídas con un sencillo gancho de alambre que tiene una prolongación que sirve como disparador de la carga. El disparador puede hacerse funcionar desde tierra colocando un cono de papel, llamado mensajero, alrededor de la cuerda de amarre y dejando que el viento lo eleve hasta la cometa, donde accionará el disparador y liberará el gancho *(véase la ilustración inferior de la página anterior).*

También se puede liberar cargas y operar obturadores de cámaras por medio de un fusible. Para preparar el fusible hay que mojar una trenza de hilo de algodón ordinario en una disolución saturada de salitre (nitrato potásico) en agua. Déjese secar la cuerda. Cuando ésta se quema, arde sin llama a una velocidad de unos 7,6 centímetros por minuto.

Para hacer una fotografía con esta técnica, se debe atar el disparador de la cámara en su posición de cerrado con un trozo de fusible corto. Se estira una goma de caucho sobre el disparador desde la posición opuesta, de forma que ejerza una fuerza en dirección contraria. Se sujeta el extremo libre de la goma elástica a un punto conveniente del cuerpo de la cámara.

Se corta la longitud del fusible adecuada al intervalo de tiempo deseado. Si se desea que el disparo se produzca a los 10 minutos conviene hacer un fusible de 81 cm de longitud. Se pasan 2 cm de esta longitud a través del fusible, que ata al disparador y queda asegurado con un nudo *(véase la ilustración de la parte superior de esta misma página).* El disparador funcionará diez minutos después de que se encienda el extremo libre del fusible de 81 cm. La cámara puede mantenerse mirando a cualquier dirección, acoplándole una veleta.

El ángulo con el que la cometa ataca el viento puede abrirse más o cerrarse durante el vuelo, insertando en la brida un lazo de cuerda que se mantenga cerrado mediante un gancho disparador o un fusible. Cuando el lazo se suelta, se abre, aumentándose así la longitud de la brida y alterando, por lo tanto, el ángulo



Instrumento para medir ángulos

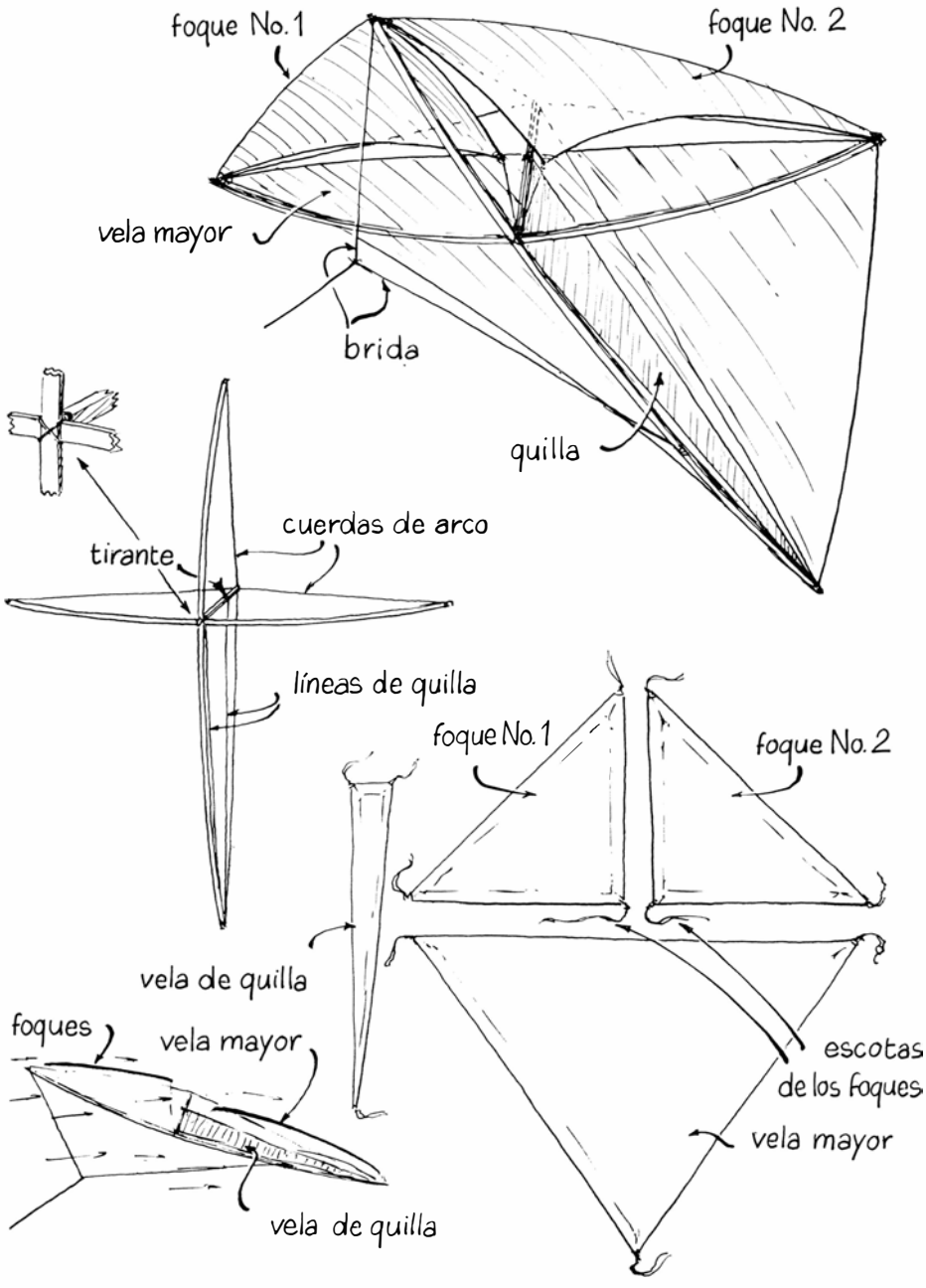
de ataque. El lanzador de cometas moderno puede llevar a cabo estas y otras operaciones por radiocontrol. Pueden construirse receptores de radio versátiles, con transistores, que pesen menos de 30 gramos y sean capaces de secundar un conjunto notable de órdenes.

La altura aproximada de una cometa sobre tierra puede determinarse multiplicando la longitud de la cuerda de amarre por el seno trigonométrico del ángulo comprendido entre la cometa, el extremo de la cuerda y el punto situado directamente debajo de la cometa. Nosotros marcábamos la cuerda con pintura de color a intervalos de 30 metros: rojo, amarillo, azul, verde y negro, a lo largo de los primeros 150 metros; luego rojo-rojo, rojo-amarillo, rojo-azul, y así sucesivamente durante los 150 metros siguientes. Después, utilizábamos combinaciones de tres colores, cuatro colores, y así sucesivamente. Para medir el ángulo, atábamos un transportador y una plomada a una vara con un par de visores sobre ella *(véase la ilustración inferior de la página precedente).* Para corregir el error de la comba de la cuerda de amarre se multiplica la altura por 0,96. Por ejemplo, ¿qué altura tiene una cometa que vuele con un ángulo de 30 grados, con una cuerda de 150 metros? El seno de 30 grados es 0,5, y 150 veces 0,5 por 0,96 son 72 metros.

Las características aerodinámicas de las cometas invitan a la innovación. Hicimos varios diseños, uno de los cuales nos reportó grandes satisfacciones, hasta que supimos que había sido ensayado, por distintos autores, varias veces. Se nos ocurrió que el empuje de una cometa podría ser mejorado utilizando un truco de los diseñadores de balandros de competición. Estos barcos tienen un foque y una vela mayor. Desde un punto de vista aerodinámico, el foque importa poco en el movimiento hacia adelante del barco; si se dirige una corriente de aire en el ángulo apropiado detrás de la vela mayor, el foque aumenta la efectividad de ésta en unas tres veces, de acuerdo con el proyectista alemán de yates Manfred Curry. El "ala plegada" de los aviones de alto empuje es otra aplicación del principio del foque. ¿Por qué no adaptar a la cometa un par de foques? Decidimos hacerlo así.

La estructura de la cometa con foques se parece a la de la cometa malaya. Consiste en un larguero y una cruceta perpendiculares. Un tirante se extiende verticalmente desde la cruz a sotavento y se une al extremo exterior por un par de cuerdas de arco atadas al larguero y a la cruceta. Las velas se hacen de nylón delgado, tejido tupidamente. Una vela triangular, que semeje una banderola, se ata entre el tirante y el extremo inferior del larguero (*veáse la ilustración superior*). La vela mayor triangular se ata a los extremos de la cruceta y al extremo inferior del larguero, y se curva sobre la quilla. Se atan dos ángulos de cada foque a los extremos de la cruceta y a la parte superior del larguero. El tercer ángulo de cada foque se ata sin tensión a la cruz de la estructura. Los foques se ajustan de tal manera que el aire fluya sobre las superficies más bajas de los mismos y pase sobre el borde de ataque de la vela mayor. Como en el caso de un barco de vela, el ajuste óptimo de los foques varía con la fuerza del viento y debe ensayarse su modificación a fin de lograr el máximo empuje. La cometa parece desarrollar unas dos veces el empuje de una cometa francesa de guerra para velocidades del viento de hasta 19,2 km por hora. Habíamos programado hacer una serie de ensayos de la cometa de foques en el túnel estuviera acabado y mis colaboradores volvieran a la escuela.

Una advertencia prudente: póngase siempre guantes de piel cuando sujete la cuerda de una cometa, en particular si utiliza el nylón. Una cuerda en movimiento le puede quemar y cortar la mano. Nunca haga volar una cometa sobre una multitud o con una cuerda de más de 30 metros cuando esté a menos de 1660 metros de un aeropuerto.



Cometa de foques

Taller y laboratorio

Las sales reaccionan en un gel para producir bandas de Liesegang en color

C. L. Stong

En 1896, el químico alemán R. E. Liesegang, mientras experimentaba con materiales fotográficos, descubrió un fenómeno raro. Había derramado en un recipiente de vidrio una capa fina de gel de gelatina que contenía cromato de potasio. Había introducido luego un cristal de nitrato de plata en medio del gel. A los pocos días, creció expandiéndose un conjunto de anillos concéntricos, a partir del nitrato de plata, de modo que los espacios interanulares aumentaban logarítmicamente según su distancia al centro. Liesegang observó que los anillos coloreados eran cristales de cromato de plata incrustados periódicamente en el gel. No resultaba sorprendente que se formaran cristales por la reacción del nitrato de plata con el cromato de potasio, pero, ¿por qué reaccionaban las sales para formar anillos periódicos?

Otros investigadores han venido repitiendo el experimento desde entonces usando numerosas sales y geles que producen bandas rítmicas. Algunas reacciones originan bandas logarítmicas secundarias; otras forman bandas periódicas, pero no logarítmicas. En su conjunto, los modelos muestran todos los colores del arco iris.

En la naturaleza se encuentran modelos similares, unos en minerales, como en la limonita y en la calcedonia, y otros en animales, como en las alas de ciertas mariposas polícromas. Nadie cree que estos modelos naturales sean consecuencia de la reacción de Liesegang; es más, ni siquiera la reacción ha sido explicada a satisfacción de todos. El enigma continúa intrigando a los aficionados y a los científicos.

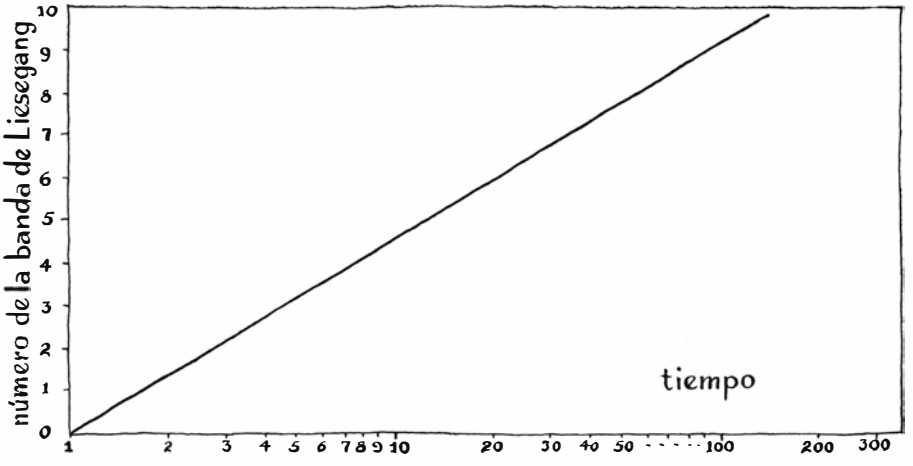
Así nos escribía un joven estudiante: El experimento de Liesegang requiere sólo unos pocos aparatos, no muy costosos: una balanza capaz de pesar productos químicos de hasta 0,1 gramos, una probeta graduada de 10 mililitros de capacidad, otra de 50 mililitros y una pipeta graduada de un mililitro con divisiones de 0,1 mililitros o, preferiblemente de 0,01 mililitros. Hay que disponer, además, de unos cuantos recipientes planos y de una docena de tubos de ensayo con una capacidad de 30 a 50 mililitros para utilizarlos en la reacción.

El éxito de los experimentos depende, en parte, de la preparación de disoluciones de concentración conveniente. Especificaré las concentraciones según su molaridad. Por convención, una solución uno molar (1M) de cualquier compuesto químico contiene $6{,}023 \times 10^{23}$ moléculas de este compuesto por litro de solución. Este número de moléculas, conocido como número de Avogadro, es exactamente igual al peso molecular del compuesto expresado en gramos. Por ejemplo, una molécula de ácido acético (CH_3COOH) contiene dos átomos de carbono (cuyo peso atómico de cada uno es 12), dos átomos de oxígeno (cada uno de peso atómico 16) y cuatro átomos de hidrógeno (cada uno de peso atómico 1). Sumando los pesos atómicos ($24 + 32 + 4$) el peso molecular del ácido acético resulta ser 60. Sesenta gramos de ácido acético contienen, pues, $6{,}023 \times 10^{23}$ moléculas que, diluidas en agua hasta formar un volumen de 1000 mililitros, forman una solución de concentración 1 molar. Para preparar una solución 0,1 molar debe diluirse en agua seis gramos de ácido hasta formar un volumen de 1000 mililitros, y así sucesivamente. Los pesos atómicos de todos los elementos químicos y los pesos moleculares de muchos compuestos se encuentran publicados en todos los manuales.

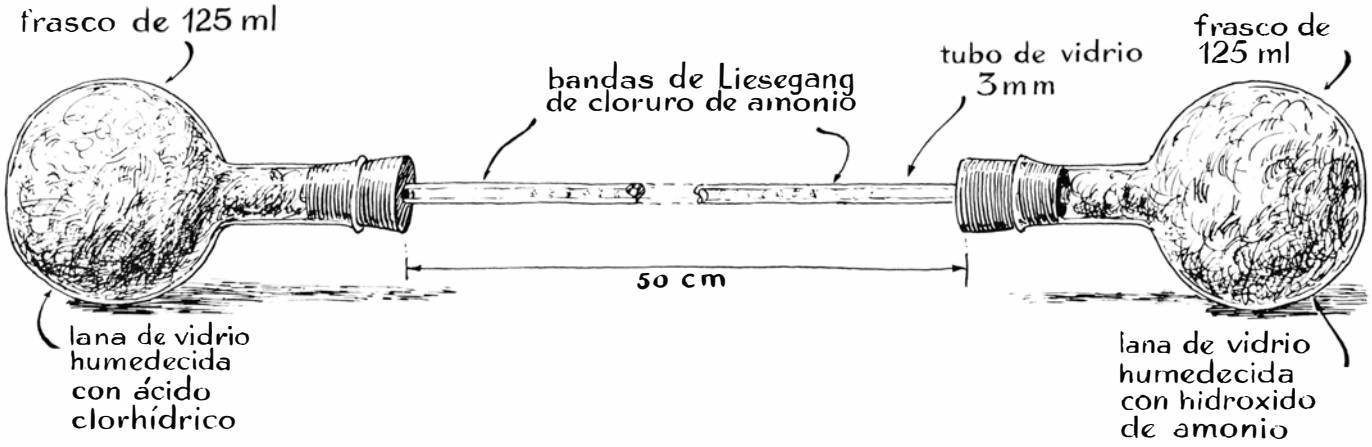
Liesegang hizo su experimento con gel de gelatina, pero pueden utilizarse otros geles: por ejemplo: agar, gel de plasma sanguíneo, coagulados derivados de la celulosa y el gel de sílice. Realicé la mayoría de mis experimentos con gel de sílice, preparado al añadir ácido acético a una solución de silicato de sodio, denominada comúnmente vidrio soluble.

En las droguerías puede adquirirse solución de silicato de sodio. Hay que diluirlo hasta que alcanze una densidad de 1,06 gramos por mililitro. La densidad del material comercial suele ser desconocida, pero puede determinarse pesando una muestra de la solución. Pese un recipiente seco y limpio. Traspase a este recipiente 100 mililitros exactos de solución y pese de nuevo. Reste el peso del recipiente lleno para determinar el peso neto de la solución. Habitualmente, el peso neto de 100 mililitros de una solución comercial de silicato de sodio es de unos 130 gramos.

Supongamos que, en este ejemplo, el peso es de 130 gramos. El peso indica



Crecimiento logarítmico de las bandas de Liesegang con relación al tiempo



Aparato de Roger Sassen para desarrollar las bandas en un gas

que la solución contiene 30 gramos de silicato de sodio, ya que 100 mililitros de agua pesan, aproximadamente, 100 gramos. La solución que ha de usarse para decantarse en un estado de gel debe contener solamente seis gramos de silicatc de sodio por 100 mililitros de solución. La solución necesaria se halla dividiendc treinta por seis, obteniéndose así un cociente de cinco. El silicato de sodio, cor una densidad de 1,06, puede obtenerse en este caso agregando una parte de solución comercial en cuatro partes de agua.

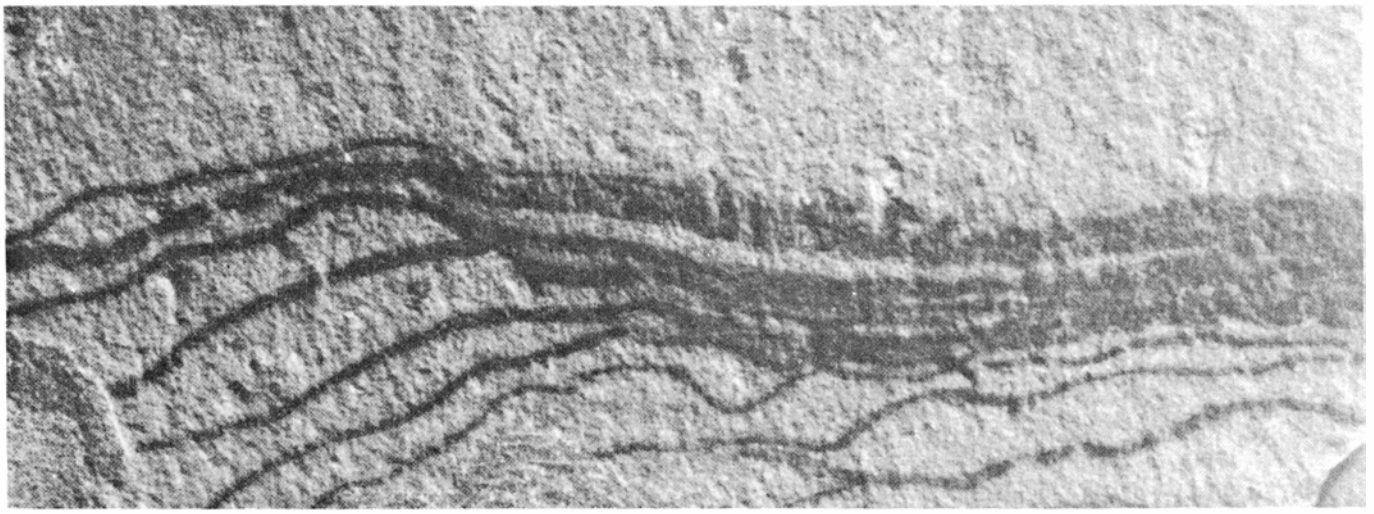
Por conveniencia, preparo varios litros de solución diluida al mismo tiempo. Siempre empleo agua destilada en todas las soluciones. La solución de silicato de sodio diluida se convierte en gel inmediatamente antes de usarse en cada experimento. El gel se prepara añadiendo a la solución diluida un volumen igual de solución de ácido acético cuya concentración esté comprendida en el intervalo de 0,5M a 1 M, en función de las exigencias del experimento. El gel se formará en menos de una hora.

Cuando se examina el gel en un microscopio, parece una esponja empapada en agua. La velocidad de las reacciones químicas en gel de sílice está regida por la lentitud con que los fluidos se difunden a través de la masa porosa. Por esta razón, los cristales crecen despacio en el gel, si bien muestran una notable perfección de forma.

Como introducción a la técnica del gel puede crearse cristales de acetato de plata, que son largos, coloreados y en forma de agujas. Se mezclan 10 mililitros de silicato de sodio diluido, de densidad 1,06, con 10 mililitros de ácido acético 1M y se traspasan a un tubo de ensayo de 30 mililitros. Después de formado el gel, se llena el espacio restante por encima de él con una solución 0,5M de nitrato de plata. Los cristales van apareciendo a los pocos días, a medida que el nitrato de plata se va difundiendo en el gel.

Para reproducir una versión del experimento de Liesegang, se disuelve tres gramos de gelatina ordinaria, sin endulzar ni aromatizar, en 96,6 gramos de agua calentada a 60 °C. Se agita 0,4 gramos de cromato de potasio dentro de la mezcla. Se vierte la mezcla dentro de un recipiente poco profundo y se deja enfriar. Mientras se va enfriando, se disuelve un cuarto de gramo de nitrato de plata en un mililitro de agua. Cuando se haya formado el gel, se introduce con suavidad una gota de solución de nitrato de plata en el gel, hacia el centro. A los pocos minutos comenzarán a formarse anillos de cromato de plata.

Prefiero dejar que las reacciones se desarrollen en tubos de ensayo, de tal suerte que aparezcan bandas en vez de anillos. Los tubos pueden cerrarse con tapones para evitar la evaporación, de forma que las reacciones puedan continuar sin estar uno pendiente en todo momento de ellas. La técnica del tubo de ensayo resulta particularmente conveniente en reacciones que se prolonguen a lo largo de varias semanas; así, el acetato de cobre y del cromato potásico que se combinan para formar interesantes bandas especiales de cromato de cobre.



Anillos de limonita en el basalto

Prepare el gel para esta reacción mezclando 20 mililitros de silicato de sodio con 20 mililitros de una solución formada por dos mililitros de cromato de potasio 1M y 0,6 mililitros de ácido acético concentrado. Traspase la mezcla a un tubo de ensayo de 50 mililitros. Después de que el gel se haya formado, llene el resto del tubo con disolución de acetato de cobre 0,25M; sustitúyala luego con solución fresca de acetato de cobre cada semana. Cuando aparezcan algunas bandas será posible verificar la ecuación que relaciona las distancias de las precipitaciones sucesivas de Liesegang con una constante $Y_n/Y_{n-1} = K$, en la que Y es la distancia desde la interfase entre el líquido y el gel al centro de la banda elegida, n es el número de orden de la banda, a partir de la interfase, y K es la constante.

Las bandas de Liesegang pueden formarse en una semana si se usan tubos capilares en vez de tubos de ensayo. Los capilares deberán tener un diámetro uniforme, como los que se emplean para determinar el punto de fusión de productos químicos. Los extremos sellados de los tubos empleados para determinar el punto de fusión deben estar rotos. Para formar bandas de cromato de cobre con esta técnica, sostengo el capilar en posición casi horizontal y sumerjo un extremo en una solución recientemente preparada de silicato de sodio y un volumen igual de ácido acético 0,5M que es, a la vez, 0,25M respecto del cromato de potasio. El tubo se llena por capilaridad. Cuando se ha formado el gel, el tubo se coloca para que la reacción se desarrolle en un tubo de ensayo tapado que contenga solución de acetato de cobre, 0,25M.

Una vez desarrollada la reacción, se saca el capilar del tubo de ensayo para estudiarlo. Las distancias entre las bandas pueden registrarse con un lápiz sujetando el capilar a un trozo de papel y midiendo con una regla y un pie de rey. Las bandas se forman tan rápidamente en los capilares que, en algunos casos, se puede verificar la ecuación que establece que la distancia a una banda desde la interfase, dividida por la raíz cuadrada del tiempo requerido para su formación, es igual a una constante, $Y_n/t_n^{1/2} = K$ en donde Y es la banda que nos interesa y t es el tiempo.

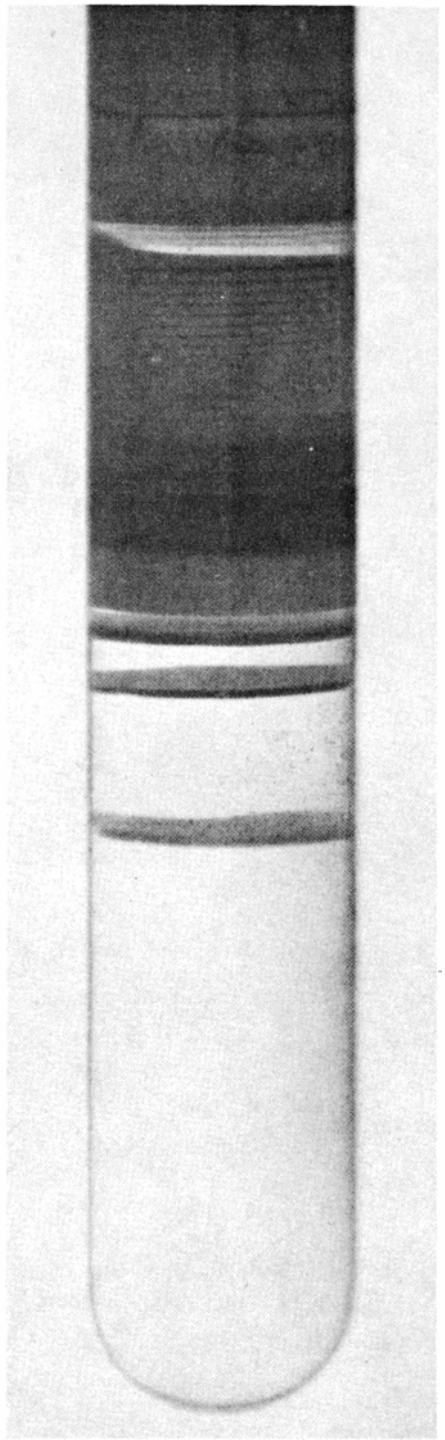
Un experimento particularmente atractivo consiste en la precipitación de oro metálico y en el desarrollo de una serie en bandas al exponer el gel a la luz del sol. Para hacer este experimento hay que preparar una solución de silicato de sodio que incluya un mililitro de solución al 1 por ciento (en peso) de cloruro de oro amarillo. Se traspasa la mezcla a un tubo de ensayo y se convierte en gel añadiendo un volumen igual de ácido sulfúrico 1,5M. La conversión en gel tarda aproximadamente una semana. Se llena el espacio remanente sobre el gel con una solución hecha disolviendo en agua tanto ácido oxálico cuanto sea posible, creando una solución saturada. Al cabo de algunos días se formarán en el gel miles de cristales de oro, diminutos y brillantes. Si todo ha ido bien, las bandas de Liesegang aparecerán una vez que el gel se haya expuesto a la luz solar.

La naturaleza del gel influye en la forma de los productos cristalizados, como puede demostrarse por el crecimiento de los cristales de yoduro de plomo. En un tubo de ensayo, se prepara un gel de sílice con solución de ácido acético 1M que sea 0,05M con relación al acetato de plomo. Sobre el gel se vierte una solución saturada de yoduro de potasio. Aparecerán cristales translúcidos de yoduro de plomo amarillo, formando dendritas empenachadas y placas hexagonales de crecimiento independiente. Cuando se sustituye el gel de gelatina por gel de sílice, la misma reacción produce las bandas de Liesegang.

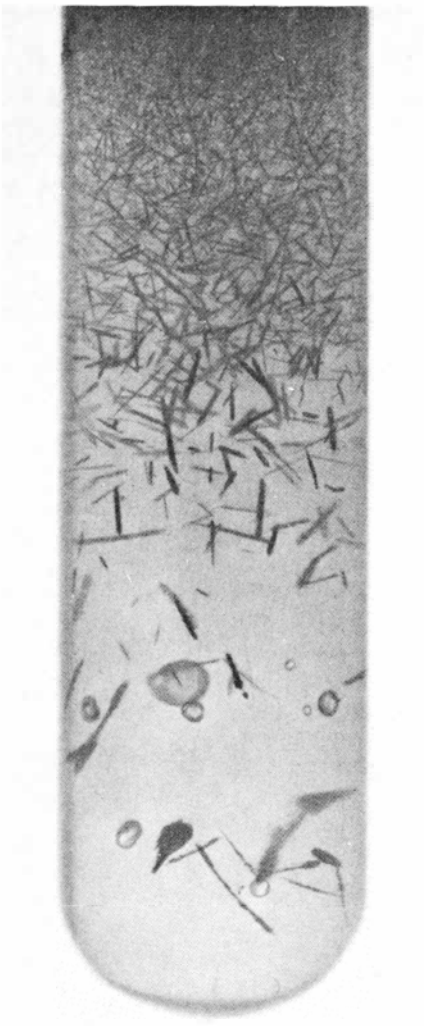
Pueden obtenerse también modelos en espiral. Un ejemplo puede ser el precipitado verde del hidróxido de cobalto. Mezcle cinco mililitros de solución de nitrato de cobalto 0,1M con treinta mililitros de solución de gelatina al 10 por ciento, caliente, en un tubo de ensayo de 50 mililitros. Después de que el gel se enfríe y sedimente, llene el espacio vacío con una solución de hidróxido de amonio 0,2M. Puede formarse una espiral o algún modelo en espiral, pero no siempre ocurre así. Si no sucede, ensaye de nuevo.

Liesegang sugirió que los anillos y bandas de las ágatas surgían cuando el fenómeno que lleva su nombre se producía en geles de sílice sencillos que se convertían más tarde en cuarzo microcristalino, pero actualmente los geólogos coinciden en que los modelos de ágata pueden atribuirse a depósitos sucesivos de capas de gel de sílice y de impurezas. También aparecen modelos de bandas en algunas estalactitas, en oolitos, en algunos sedimentos y, desde luego, en los anillos de los árboles. Cuando en el patrón de estos materiales se representa el número de orden de cada banda en función del logaritmo de la distancia de la banda desde su origen, el gráfico resultante suele ser una curva. En cambio, los gráficos comparables de casi todos los modelos conocidos de Liesegang son líneas rectas *(véase la ilustración de la página 109)*. Las estructuras de la limonita, que crecen en forma de anillos concéntricos durante el envejecimiento de las rocas sedimentarias, dan lugar a gráficos que se aproximan a una línea recta. En muchas muestras, los anillos aparecen distorsionados e incompletos.

Durante la década de los veinte se prepararon ágatas sintéticas en el laboratorio con el fin de descubrir las condiciones que pudieran causar la formación de anillos de Liesegang en un medio ambiente natural. Se introdujo gel de sílice que contenía ferrocianuro de potasio en



Bandas de vanadato de mercurio



Cristales de plata en gel de sílice

bolsas de colodión, y se las sumergió en solución de sulfato de cobre. Después de algunas semanas, los iones de cobre se difundieron en las partículas del gel y reaccionaron para formar precipitados tridimensionales en forma de banda. Las ágatas sintéticas se secaban después lentamente bajo presión hasta que adquirían una dureza de alrededor de cinco de la escala de Mohs, lo que significa que eran tan duras que apenas si se podían rayar con un cuchillo. Aunque el experimento era sugerente, no bastó para probar que las ágatas se forman de esta manera.

Es fácil realizar una versión bidimensional de este experimento. Haga crecer anillos concéntricos de cromato de cobre en una capa fina de gel de sílice situada entre dos portaobjetos de microscopía. Vierta una mezcla de gel de sílice hecha con ácido acético 0,5M, que es 0,25M con relación al cromato de potasio, sobre un portaobjetos, y ponga el otro sobre él, teniendo cuidado de no atrapar burbujas de aire en el gel. Se puede crear una capa más gruesa, en la que los anillos sean más fáciles de ver, aumentando la distancia entre los portaobjetos, mediante la introducción de unas cuantas partículas de vidrio aplastado.

Sumerja el emparedado en una solución de acetato de cobre 0,25M. En una semana, conforme los iones de cobre se vayan difundiendo hacia el interior, precipitarán en anillos concéntricos. Estos se parecen a los anillos de la limonita que se encuentra a veces en las grietas de las rocas, lo que sugiere que tales formaciones pueden ser ocasionadas por la penetración de soluciones de agua subterránea dentro de la roca agrietada *(véase la ilustración inferior de la página 110).*

Se puede demostrar que la presencia de gel en rocas agrietadas no es indispensable para la creación de tales conformaciones. Coloque entre dos portaobjetos de vidrio una solución de yoduro de potasio 0,1M y deje difundir dentro de la fina película una solución 0,5M de nitrato de plata. Normalmente aparecerán anillos delicados e irregulares. El experimento no siempre tiene éxito, por lo que puede recurrirse al método de ensayo y error.

Puede observarse otros ejemplos de estructuras periódicas que se forman sin gel, dejando evaporar desde la superficie de un vidrio una gota de solución saturada de dicromato de potasio. Se desarrollarán anillos concéntricos de cristales color naranja. El fenómeno se denomina cristalización periódica. Se formarán tenues espirales de cristales de dicromato de potasio, si se deja que una película delgada de solución se evapore sobre un portaobjeto de vidrio ligeramente calentado. La cristalización suele comenzar cerca de los bordes y avanza hacia dentro en espiral, pero si se aloja una partícula de polvo en las proximidades del centro de la película, la cristalización puede comenzar junto a esta partícula y avanzar en espiral hacia el exterior.

Las estructuras periódicas cristalinas se preparan también enfriando películas finas de sustancias fundidas. Un ejemplo de ello es una película fina de azufre fundido que se enfríe lentamente sobre las paredes de un tubo de ensayo Pyrex. Hay sustancias orgánicas fundidas, tales como el bencilo y la acetanilida, que cristalizan en anillos concéntricos.

Otro ejemplo interesante del fenómeno de Liesegang, empleando aire como medio en vez de gel, se produce cuando los vapores de ácido clorhídrico y de hidróxido amónico se difunden en el interior de un tubo largo de cristal partiendo desde extremos opuestos. Al cabo de una hora, se formará un precipitado de bandas finas de cloruro amónico fumante aproximadamente en la mitad del tubo. Construya el aparato cortando un trozo de 50 a 75 centímetros de tubo de vidrio de tres milímetros de diámetro; limpie en la llama los extremos, lave el tubo con solución de detergente, enjuáguelo con agua destilada y déjelo secar. (No use tubo de más de tres milímetros de diámetro.)

Acople a los extremos del tubo matraces que tengan una capacidad de unos 100 mililitros y que estén llenos con lana de vidrio poco prensada. Los matraces pueden improvisarse usando tubos rectos secos o con cualquiera de los aparatos equivalentes, tales como un par de frascos de 125 mililitros cerrados con tapones perforados *(véase la ilustración superior de la página 110).* El aparato debe sellarse al aire; una pequeña fuga puede estropear la reacción. El tubo de difusión debe estar nivelado y protegido contra cambios bruscos de temperatura. Humedezca la lana de vidrio de un matraz con dos mililitros de ácido clorhídrico 10M y la lana del otro matraz con el mismo volumen de hidróxido amónico 1,5M. Estas soluciones pueden hacerse partiendo de las existencias de reactivos. El ácido clorhídrico concentrado suele ser 12M y, 15M el hidróxido amónico concentrado que suele emplearse.

Las configuraciones de Liesegang aparecen como anillos o bandas, pero algunas son figuras simétricas. Una línea recta trazada sobre el eje de simetría divide estas formas en dos imágenes especulares que semejan las huellas de algunos organismos. Esta semejanza, unida al hecho de que el cuerpo de las células vivientes contiene gel, ha sugerido a algunos biólogos la posibilidad de que el fenómeno de Liesegang pudiera tener significación biológica.

Darwin describió configuraciones de color en muchos organismos. Liesegang estuvo tentado de explicar dichas configuraciones como ejemplos de precipitación periódica. «Ya que ningún adorno es más hermoso» dijo, «que los ocelos de las plumas de varios pájaros, que los abrigos vellosos de ciertos mamíferos, que las escamas de los reptiles y los peces, que la piel de los anfibios, que las alas de muchos lepidópteros y de otros insectos, merecen ser destacados de modo especial. Un ocelo consiste en una mancha dentro de un anillo de otro color, como la pupila dentro del iris, pero la mancha central está frecuentemente rodeada de zonas concéntricas adicionales». Darwin describió una mariposa nocturna de Africa del Sur en la cual un magnífico

ocelo ocupaba casi la totalidad de la superficie de las alas posteriores; consiste en un centro negro... rodeado por zonas sucesivas de colores ocre-amarillo, negro, ocre-amarillo, rosa, blanco, rosa, marrón y blanco pálido. Aunque desconocemos las etapas por las que se forman estos adornos maravillosamente bellos y complejos, el proceso ha sido probablemente sencillo.

Usando como medio un gel, se puede formar configuraciones fascinantes de diseño y color similar. Por ejemplo, en uno de mis experimentos, el efecto se demostró dejando difundirse una solución que contenía nitrato de plata y nitrato de mercurio en una capa de gel que ocupaba el espacio remanente entre dos portaobjetos de vidrio. El gel, hecho con solución de ácido acético 0,5M, era 0,25M con relación al cromato de potasio. Dicho sea de paso, hay colonias de ciertos microorganismos que crecen en estructuras consistentes en espirales o bandas concéntricas; y se han usado, asimismo, bandas de Liesegang de sustancias inhibidoras del crecimiento para favorecer el crecimiento de cultivos de bacterias en forma de anillos concéntricos.

No se han producido muchos modelos de Liesegang con reactivos orgánicos, aunque algunos experimentadores han inducido la precipitación periódica de compuestos haciendo reaccionar sustancias inorgánicas con compuestos orgánicos. Estas reacciones son más rápidas si el compuesto orgánico que se difunde lentamente se coloca en un gel. Puede desarrollar bandas colocando una solución de nitrato de níquel sobre el gel de sílice preparada con solución de ácido acético 0,5M que contenga vestigios de dimetilglioxima. El que un amplio número de reacciones orgánicas pudieran producirse en un gel como medio y pudiesen tener significación bioquímica permite abrigar la esperanza de que la búsqueda de nuevos ejemplos orgánicos del fenómeno de Liesegang acabe por convertirse en un entretenimiento retador emocionante.

La mayoría de los compuestos químicos usados en estos experimentos son tóxicos. Algunos pueden causar graves quemaduras. Manéjelos apropiadamente. Use un balón de goma elástico, y no la boca, para aspirar las soluciones de una pipeta. Trabaje en una estancia ventilada y próxima a una fuente de agua corriente, de manera que, en caso de accidente, pueda lavarse rápidamente la piel para eliminar los productos químicos. Guarde los productos químicos fuera del alcance de los niños y de los animales domésticos.

Taller y laboratorio

Los placeres y los problemas de la cría de caracoles en casa

C. L. Stong

El verano pasado puse un centímetro de barro procedente de un estanque en un frasco de vidrio, añadí agua del estanque y dejé el frasco en el alféizar de una ventana. Muy pronto el agua comenzó a rebullir de microorganismos, estando al parecer cada especie empeñada en cargar el equilibrio ecológico en su favor. Luego apareció un par de manchitas como cabezas de alfiler. Se adherían a la pared del frasco, y, al moverse, dejaban huellas transparentes sobre el vidrio empañado. En un plazo notablemente breve, las manchitas acabaron con mi diversión; al madurar, se habían transformado en un par de aburridos y voraces caracoles que, aparentemente, se comieron o envenenaron a todos los demás organismos.

Me quejé de los caracoles a Robert A. Brown, que había pertenecido a la New York Zoological Society y dirige ahora la Anti-Cruelty Society. "¡Pero si los caracoles son unos animales estupendos!" exclamó. "No los minusvalores hasta no conocer a uno personalmente." Luego me redactó un procedimiento para llegar a conocer los caracoles, que es, en esencia, el que transcribo.

Los caracoles se comportan de una manera curiosa y estrafalaria. Por ejemplo, se sumergen en un estado de latencia al encontrarse con distintas y numerosas condiciones ambientales desfavorables, tales como un exceso de calor, de frío o de sequedad. Los caracoles terrestres son especialmente fáciles de observar y de cuidar. Representan a uno de los grupos zoológicos más importantes, los moluscos. Se han desarrollado unas 80.000 especies de moluscos, de las cuales sobrevive la mitad.

De los varios miles de tipos de caracol terrestre, quizá el más fácil de mantener y observar en mi país, Norteamérica, sea el *Otala lactea.* Se envía en cestas de mimbre, como alimento, a Nueva York y otros centros metropolitanos, desde el norte de Africa, principalmente desde Marruecos. Es un pariente próximo del "escargot", el apreciado caracol comestible de los gourmets franceses. Se dice que París consume más de 200 millones de escargots por año.

O. lactea es algo más pequeño que el "escargot"; el interior de la abertura de la concha es de color castaño oscuro. Si no se encuentra esta especie en particular, sépase que el procedimiento rige para caracoles terrestres de cualquier especie. Basta con tres ejemplares, pues éstos se multiplicarán. Además, la faena de mantener limpias las cajas con caracoles no es una bagatela, y aumenta en proporción al número de individuos.

Los caracoles comprados en un mercado le llegarán indudablemente en un estado latente llamado estivación, en el que caen cuando están calientes y secos. La estivación es la contrapartida de la hibernación, el período latente en que entran algunos animales durante los fríos meses de invierno.

Diversos observadores han informado que diferentes caracoles han sobrevivido en estivación durante cuatro o cinco años sin salir de su concha. Cuando el animal está en estivación no entra en actividad a menos que se le exponga a la humedad o se le perturbe. Cuando reciba los animales, manténgalos en un lugar seco hasta tenerles lista su caja.

Examine cuidadosamente cada ejemplar. Marque un distintivo en su concha con una laca coloreada, verbigracia un esmalte de uñas. Yo suelo anotar la marca de identificación en la parte superior de una página de un cuaderno. Peso cada ejemplar en un pesacartas y registro su peso en el cuaderno conjuntamente con su coloración y cualquiera marca distintiva que posea.

Los pequeños acuarios de vidrio que venden los comerciantes en peces tropicales son igualmente útiles. El nuevo recipiente debería lavarse con jabón y agua y enjuagarse bien. Coloque una delgada capa de hojas caídas, una hoja de lechuga, trozos de zanahoria y una o dos ramitas en el fondo, junto con un recipiente poco profundo que contenga de tres a cinco milímetros de agua y un segundo recipiente con tierra buena de la que se vende para maceteros. Estos materiales estimulan, al parecer, a los caracoles proporcionándoles un entorno diversificado en cuanto a sabores y olores.

El recipiente para la tierra puede ser un pequeño tiesto para flores o una caja rectangular de plástico. La capa de tierra debe tener un espesor de 2 cm por lo menos. Mantenga la tierra húmeda pero no anegada. Los animales pondrán sin duda sus huevos en ella.

Normalmente, los animales estarán más activos de noche, pero se puede invertir su ciclo de comportamiento para observarlos durante el día. Ilumine toda la noche el acuario mediante una bombilla brillante. Por la mañana, cubra el acuario con una tela opaca. Para observar los animales durante el día baje las persianas y quite la cubierta. Los caracoles pueden adaptarse a una inversión del día y la noche al cabo de una semana, aproximadamente. Si con esta técnica no logra estimularlos durante el día, inténtelo colocándolos en una fuente con agua de poca profundidad.

No mantenga sobrepoblado el acuario. Basta con tres caracoles. Si quiere seis, monte un segundo acuario. No introduzca en el recipiente ningún material que no pueda lavarse o eliminarse, excepto la tierra. Retire los caracoles y todos los materiales dos veces por semana y luego lave y enjuage minuciosamente el acuario para limpiarlo de limo y excremento. Arroje los alimentos no consumidos y reemplácelos con otros frescos y desechos vegetales naturales.

Los objetos naturales, tales como piedras y trozos de tiestos quebrados son adecuados como ornamentos del acuario. Debería incluirse siempre una concha de almeja o un hueso viejo. Se los irán comiendo poco a poco porque el caracol necesita una cantidad relativamente grande de calcio. Durante sus paseos por el campo puede juntar una haz de hojas caídas y ramitas, que guardará para el invierno.

Estimule a los caracoles sólo después

de tener listo el acuario. Todo lo que tiene que hacer es ponerlos sobre una superficie húmeda en su nuevo hogar. Tenga presente que está trabajando con caracoles terrestres y no acuáticos. No ponga más de tres milímetros de agua en el acuario, pues podrían ahogarse. Al cabo de unos 10 minutos, uno o más de los caracoles se activará y reptará subiendo por cualquier superficie cercana. Si alguno de ellos no ha dado señales de vida a las veinticuatro horas, quizás haya muerto. A los caracoles muertos se les puede identificar después de unos días por su fuerte hedor.

Observe frecuentemente a los animales durante el primer día después de que hayan salido de la estivación. Si en el interior del acuario el aire es húmedo, como debiera ser, los caracoles reptarán por los costados y pasarán, desafiando la gravedad, al anverso de la tapa. Usted debería poder ver al menos a uno de ellos levantar la parte anterior de su pie, su cabeza y sus tentáculos, separándolos de la tapa, retorciéndolos y repasando con su aparato bucal la abertura de su concha. El animal está comiendo su primer alimento después de ayunar durante muchos días o semanas, a saber, los restos de la película de mucus que cubre el cuerpo durante la estivación.

Los caracoles de tierra no son remilgados para comer. Aunque consumirán una amplia variedad de materias vegetales y animales, resulta entretenido descubrir sus preferencias alimentarias. En cierta ocasión ofrecí a cuatro caracoles un trozo de atún. Tres de ellos lo desdeñaron, pero el cuarto se lo comió entero. Evidentemente, los animales desarrollan preferencias individuales.

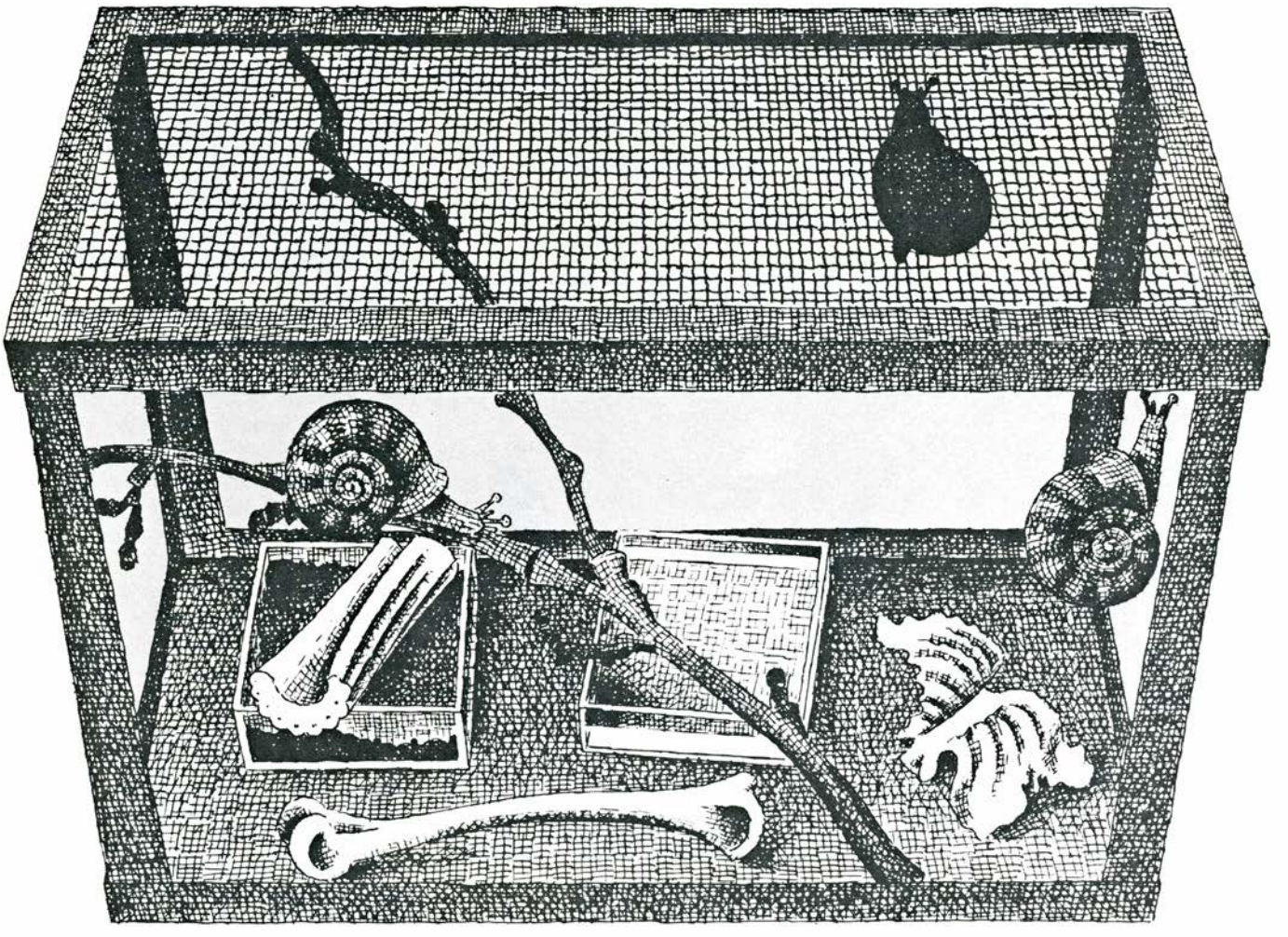
La dieta debería incluir cereales, verbigracia, copos de avena, afrecho y esos cereales envasados que se consumen en algunos países en el desayuno. Como ya he dicho, el calcio es esencial. Espolvoree unas pulgaradas de piedra caliza molida o de polvo de huesos sobre las verduras además de mantener una concha marina o un trozo de hueso.

El calcio es el material con que el caracol construye su concha, la cual crece durante toda la vida del animal desde el primer tabique. Los caracoles terrestres en su medio natural obtienen calcio de distintos materiales orgánicos. Así como el hombre ingiere calcio para sus huesos con la leche, los caracoles consumen los restos de otros animales. Si carecen de una adecuada provisión de calcio, los caracoles pueden entrar en estado de latencia

Los dos rasgos más prominentes de un caracol son su concha y su pie, que es la larga extensión del cuerpo sobre la cual se desliza. La boca está en la parte anterior del pie y puede observarse a través del vidrio o plástico cuando el animal se mueve. Cuando está abierta es un agujero circular y, al cerrarse, tiene forma de estría, como una T. La boca está algunas veces provista de maxilas.

El caracol conjuga las funciones de los dientes y la lengua en un solo órgano: la rádula, un músculo dentado, semejante a una lima, situado en el interior de la boca, que emplea como raspador para masticar el alimento. La rádula puede verse cuando la boca está abierta o cuando uno enfoca una luz fuerte a través de la cabeza por arriba y la observa desde abajo.

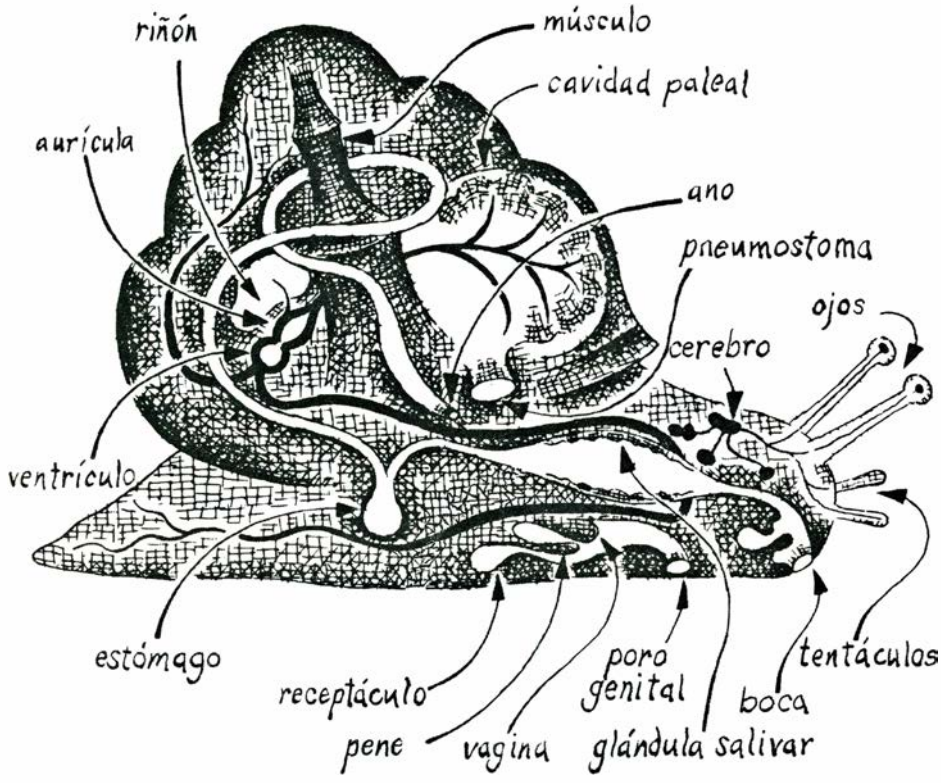
Mantenga silencio y escuche cuidadosamente cuando un caracol esté comien-



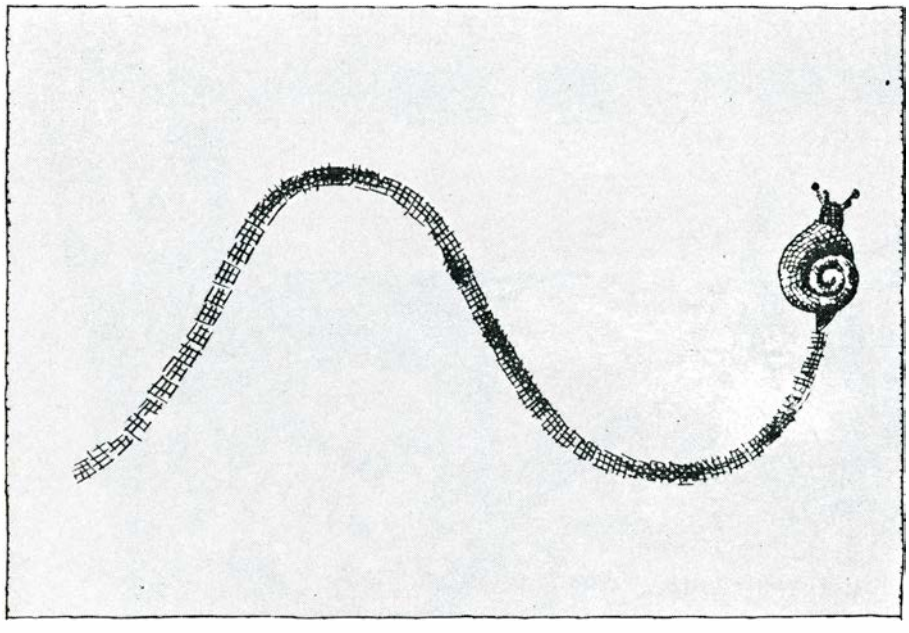
Dispositivo recomendado por Robert A. Brown para guardar caracoles

do materiales duros tales como lechuga fresca y zanahorias. Oirá un claro sonido de raspadura conforme la rádula desgasta el alimento. Se puede también sentir la rádula poniendo una delgada capa de miel o mermelada en la punta de un dedo y ofreciéndosela al caracol. El animal dejará el dedo limpio de esa capa usando la rádula. Es interesante anotar en el cuaderno las preferencias alimentarias de cada uno de los caracoles de un acuario.

El ano aparece en el costado derecho del cuerpo cuando el animal sale de su concha. Puede detectarse fácilmente cuando excreta, especialmente cuando ha comido alimentos muy coloreados. Observe en especial los órganos sensoriales de la cabeza, a saber los tentáculos anteriores y posteriores. Estos últimos son más largos. Al extremo de cada uno hay un ojo. Cuando se toca los tentáculos, se retraen invaginándose. Se les puede ver con detalle usando una luz brillante y una lupa. Los tentáculos retraídos aparecen por el procedimiento inverso de volverse hacia afuera.



Anatomía de un caracol



Tendencia a moverse hacia arriba conforme va cambiando la posición de una lámina vertical de vidrio

Observe el tejido oscuro y carnoso que circunda el borde de la abertura de la concha. Se le denomina manto. Entre otras funciones, segrega la concha. Forma asimismo una cavidad que, en el caracol de tierra, sirve como pulmón. Mirando hacia arriba, hacia la abertura de la concha, cuando el caracol ha salido de ella por completo, puede verse el gran agujero de ventilación que conduce a la cavidad del pulmón. Suele estar abierto.

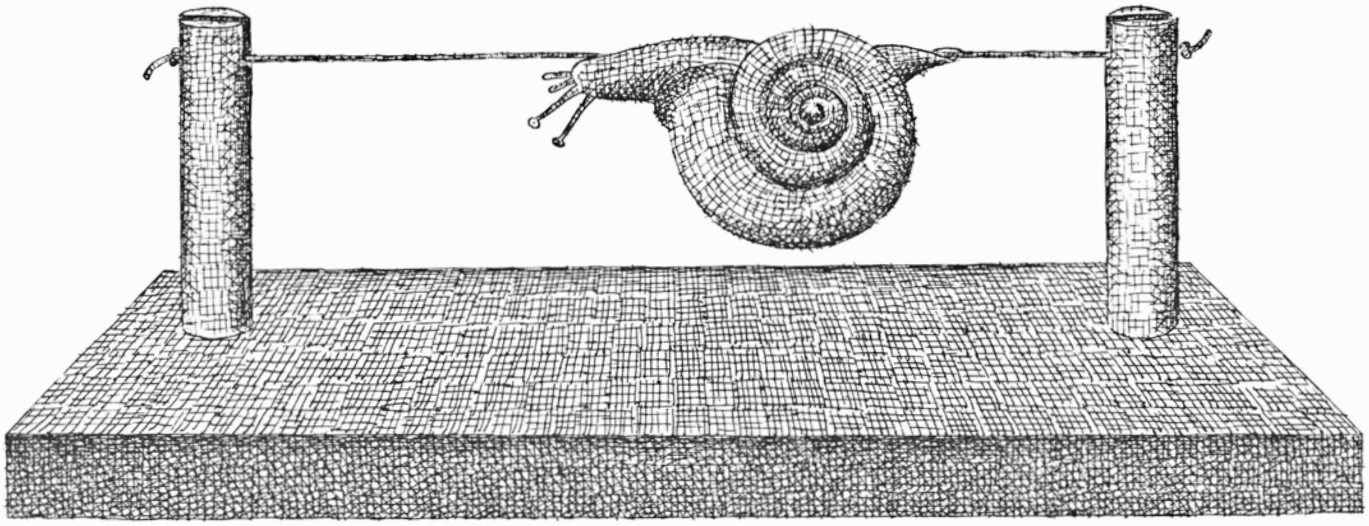
Los caracoles son hermafroditas. Cada ejemplar es al mismo tiempo macho y hembra. Los animales se juntan en un cortejo complicado y fácil de observar que culmina en la fertilización cruzada. Para aparearse, los caracoles se acarician uno a otro durante largo tiempo y luego se disparan uno al otro un dardo calcáreo antes de copular. El apareamiento se realiza cuando desde el lado derecho de la cabeza emerge el gran órgano sexual. El órgano sexual de cada caracol penetra en el órgano sexual de su pareja, y el esperma de cada animal fertiliza los huevos del otro.

Ambos caracoles depositan huevos del tamaño de una mota de polvo en la tierra. Cada vez que limpie el acuario, busque cuidadosamente los huevos. Pertúrbelos lo menos posible. Aunque son frágiles, pueden incubarse, y, si así ocurre, podrá montar un acuario separado para las crías.

Para investigar cómo se mueven los caracoles, ponga uno de ellos sobre una lámina de vidrio o plástico transparente. Mantenga vertical la lámina. El caracol se moverá hacia arriba. Haga girar lentamente en uno y otro sentido la lámina, manteniéndola vertical. El animal sentirá el cambio de la dirección de la gravedad y girará para mantener su curso ascendente.

Examine el movimiento del pie a través del vidrio. Unas ondas de contracción muscular parecerán desplazarse desde la parte trasera a la delantera del pie. Las ondas avanzan en sentido contrario al movimiento del caracol hacia adelante. De hecho, la parte del pie que se mueve hacia adelante no está en contacto con la superficie del vidrio y es, por consiguiente, menos notoria.

La huella prominente de mucus que aparece como estela del caracol es segregada por una glándula que podrá ver



Acrobacias de un caracol sobre una cuerda

inmediatamente detrás de la boca. El mucus hace posible el movimiento deslizante del caracol. Es fácil hacer una demostración de los talentos acrobáticos de estos animales. Por ejemplo, ponga uno de ellos sobre una cuerda o un hilo fino tendido horizontalmente entre dos soportes. El animal se trasladará a lo largo de la cuerda o hilo con igual facilidad con que lo hace sobre una superficie plana. Puede también deslizarse sobre superficies espinosas, como las púas de un cepillo, sin sufrir daño, ni, al parecer, molestia.

Mediante observación y unos pocos experimentos se puede comprobar que todas las partes del cuerpo del caracol sienten la luz, aunque el animal tenga ojos en el ápice de sus tentáculos más largos. La reacción del caracol ante la luz puede probarse de diversas maneras. Por ejemplo, instale una pequeña bombilla a cada lado del acuario. Encienda las bombillas de forma alterna, oscureciendo simultáneamente el lado no iluminado. El caracol se desplazará hacia el lado más oscuro.

El animal puede reaccionar ante la aproximación brusca de una pequeña sombra retirándose dentro de su concha. Pase la sombra de su mano sobre un caracol. El animal parece interpretar la sombra como una amenaza.

Unos investigadores que han extraído los ojos de los tentáculos mayores han llegado a la conclusión de que tienen poca importancia, puesto que la conducta de los animales privados de ellos no cambia significativamente. Parece que los ojos se fijan sobre objetos sólo a muy cortas distancias. Quizá vea ocasionalmente a un caracol doblar sus tentáculos oculares hacia abajo lo suficiente como para fijarlos sobre la superficie que lo sostiene.

¿Cómo reacciona un caracol ante los olores? Se puede probar el sentido del olfato colocando alimentos cocinados y calientes sobre una superficie humedecida. Observe los movimientos de búsqueda que realiza el animal, elevando la parte delantera de su pie y agitando sus tentáculos.

¿Cómo perciben los alimentos ¿Mediente el olfato o mediante la vista? Ponga dos o más pantallas opacas sobre la superficie, y el caracol entre ellas. Las pantallas pueden ser tiras de metal dobladas en forma de L. Observe el comportamiento del animal respecto de las pantallas. Luego ponga el alimento caliente detrás de las pantallas y observe las alteraciones del comportamiento.

¿Pueden distinguir estos animales entre alimentos de varias clases? ¿Muestran preferencia? Para saber la respuesta ponga una gota de vinagre en el camino de un caracol. Se echará a un lado. (No vierta vinagre sobre el animal). El caracol retraerá el borde de su pie que esté más cerca de la gota formando así un entrante. Este entrante se correrá desde el extremo anterior al posterior, a lo largo del pie, conforme el animal se vaya deslizando hacia adelante.

¿Oye un caracol? La respuesta es dudosa. El animal reaccionará ante ruidos fuertes y abruptos, quizás porque el aire hace vibrar la concha. El caracol tiene un sentido táctil finísimo. Los tentáculos se retraen con el más ligero toque. Por ejemplo, un solo hilo de telaraña que llegue flotando a tocar un tentáculo hará que este órgano se retraiga. Por otra parte, como ya he dicho, los objetos afilados no hieren el pie. Un caracol puede reptar sobre el filo de una hoja de afeitar sin cortarse.

Como es de suponer, el caracol reacciona vigorosamente ante la humedad. Después de limpiar el acuario, ponga un tabique de poca altura a lo ancho de la base, disponiendo una capa de grava seca de acuario a un lado y de grava húmeda al otro. ¿Hacia qué lado se mueve el caracol?

La reacción del animal ante la gravedad está evidentemente relacionada con su sentido del tacto. Basándose en esta reacción, podrá construir un divertido aparato. Monte un columpio de balancín en miniatura cementando la parte media de un portaobjetos de vidrio para microscopía a un trozo de cuerda que se tense a unos dos centímetros por encima de una mesa. Ponga el caracol en el portaobjetos, por el reverso de éste. El animal reptará ascendiendo por la plaquita, la cual se inclinará hacia abajo cuando aquél cruce el punto de equilibrio. El caracol dará entonces la vuelta y avanzará en dirección opuesta hasta que el columpio vuelva a inclinarse. Limite el experimento a unos pocos ciclos.

¿A qué paso marcha un caracol? La velocidad máxima a la que se mueve un caracol parece depender de varios factores. Los caracoles tienden a moverse cuesta arriba, hacia la sombra, hacia alimentos de su predilección y hacia la humedad. Algunos caracoles quizá respondan más vigorosamente que otros a diversas combinaciones de estos estímulos, por lo cual la velocidad varía según los individuos y las circunstancias. Me parece interesante cronometrar el avance de cada animal a lo largo de una distancia media de, por ejemplo, 20 centímetros cuando se mueve apartándose de la luz, ascendiendo y hacia la humedad. Registrando las preferencias de distintos caracoles se puede calcular las probabilidades para fijar los "handicap" en una carrera de caracoles.

Taller y laboratorio

Planear suspendido o esquiar por el cielo a baja velocidad con un ala de excelentes características

C. L. Stong

En los últimos años, un número creciente de pilotos de planeador no profesionales se han unido a las gaviotas y a los pelícanos, en el juego de remontar y volar a pocos metros de altura sobre las inclinadas playas de las costas. Tierra adentro pasan rozando –en la dirección del viento– las dunas arenosas y planean por las laderas y colinas libres de obstáculos. Este deporte, en rápida expansión, conocido como "esquí aéreo o planeo suspendido" exige del entusiasta habilidades casi iguales como piloto y como entendido en aerodinámica.

Los aparatos que sirven de base a este deporte varían mucho en cuanto a detalles de diseño. Suelen costar muy poco, son casi siempre de fabricación casera, y se construyen con materiales ligeros. El piloto va colgado por unos aparejos.

Muchos planeadores reconocen su origen común en una cometa triangular, patentada en 1951 por Francis M. Rogallo y su mujer Gertrude. La cometa tiene un coeficiente de planeo de más de 4:1, lo que quiere decir que, en vuelo, avanza más de cuatro metros horizontalmente por cada uno que descienda. La mayoría de los pilotos aprenden primero en una cometa tipo Rogallo, a la que con frecuencia se la llama simplemente "ala". Muchos de ellos continúan volando con la cometa prefiriéndola a los planeadores colgantes que se crearon posteriormente. Estos últimos tienen unas características mejores que las cometas, pero son más caros y más peligrosos.

La cometa Rogallo fue concebida dentro de un costosísimo programa de investigación que buscaba la manera de sustituir el paracaídas a la hora de hacer descender a la tierra las cápsulas espaciales una vez que habían entrado en la atmósfera. Tal como fue desarrollado por los Rogallo, la cometa era un ala flexible en forma de delta. Se desplegaba y mantenía su forma gracias a un sistema de cables tensos, tal como un paracaídas mantiene su forma mediante sus cables de cobertura.

La National Aeronautics and Space Administration (NASA) abandonó la cometa como sistema para el aterrizaje de cápsulas espaciales debido, principalmente, a sus dificultades para mantenerlo empaquetado y desplegarlo después. Pero varias personas interesadas en la aerodinámica idearon rápidamente algunas modificaciones que convirtieron el artefacto en un útil "planeador suspendido". Uno de ellos fue M. A. Markovski, ingeniero aeronáutico que había participado en el diseño del CD-10, de la Douglas Aircraft Company, y que luego realizó investigaciones para la Sikorsky Aircraft. Markowski sustituyó algunas líneas tensoras de la cometa de Rogallo por un armazón de tubos de aluminio y equipó la estructura con una barra de control de aluminio y en forma de *Y* invertida. Un aparejo mantiene suspendido al piloto, ya sea sentado, ya sea boca abajo, posición desde la cual puede asir la barra de control y accionarla, desplazando su peso, para controlar el cabeceo, los giros y los guiños del aparato. Markowski describe así la evolución de su proyecto.

Mi interés por los planeadores que pueden hacerse despegar corriendo, comenzó como un pasatiempo, exclusivamente por diversión. Después de diseñar diversos biplanos de ala rígida y un monoplano de los del tipo de ala rápida, llegué a la conclusión de que el "ala" de Rogallo era el medio más práctico de adquirir experiencia en el arte del planeo suspendido. Siguiendo los consejos de varios informes técnicos, recopilados por la NASA, sobre el "ala" de Rogallo, diseñé un modelo a escala natural que por fortuna voló según estaba previsto. Sobrevolar rozando

Michael A. Markowski despegando en su EAGLE III

una pista de esquí cercana resultó ser una diversión fantástica y excitante.

Rápidamente dominé el arte de despegar y aterrizar sobre mis pies sin necesidad de instructor. Es una sensación increíble correr por el suelo unos cuantos pasos y conseguir elevarse sin esfuerzo por el aire. Apenas me daba cuenta de que estaba atado a la cometa, porque el aparato representa sólo el 20 por ciento del peso total del conjunto piloto-aparato. Suspendido boca abajo, el piloto tiene una sensación de absoluta libertad, quizá porque divisa el suelo a vista de pájaro.

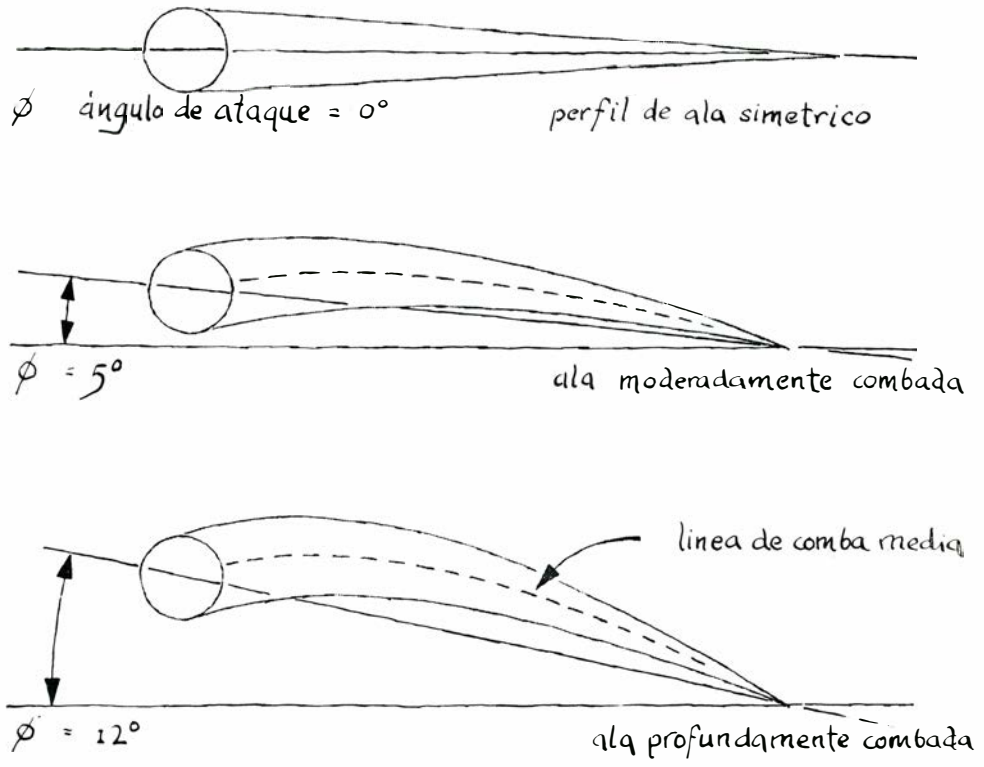
Mi primer planeador suspendido tenía una vela de polietileno de 0,1 mm y su peso total vacío era de 18 kilogramos. Me sirvió bien para muchos vuelos rasantes al terreno, hasta que la vela comenzó a estirarse, lo cual hizo disminuir el coeficiente de planeo. Conforme descendía la temperatura con la llegada del invierno de 1971, el plástico comenzó a romperse. Después de consultar a un montador de paracaídas, experto en telas, sustituí el polietileno por un nylon no desgarrable. Este material sirvió durante aproximadamente un año y después lo reemplacé, ya que el nylon resultaba demasiado elástico para mantener la curva de una buena vela. Ahora uso lona Dacron.

Este prototipo resultó ser el primero de una serie de modelos: le siguieron otros dos, uno conducido por control remoto y otro de vuelo libre, ambos en tamaño reducido; los utilicé asimismo para investigar a fondo otras características del "ala" de Rogallo. Por fortuna, estos experimentos me alertaron de la posibilidad de estrellarme. Cuando desciende el pico, aumenta la velocidad del aparato y la vela comienza a orzar y a flamear por el borde posterior. Las sacudidas de la vela avanzan hacia la cúspide y el aparato cae en picado en ángulo constantemente creciente hasta que choca contra el suelo.

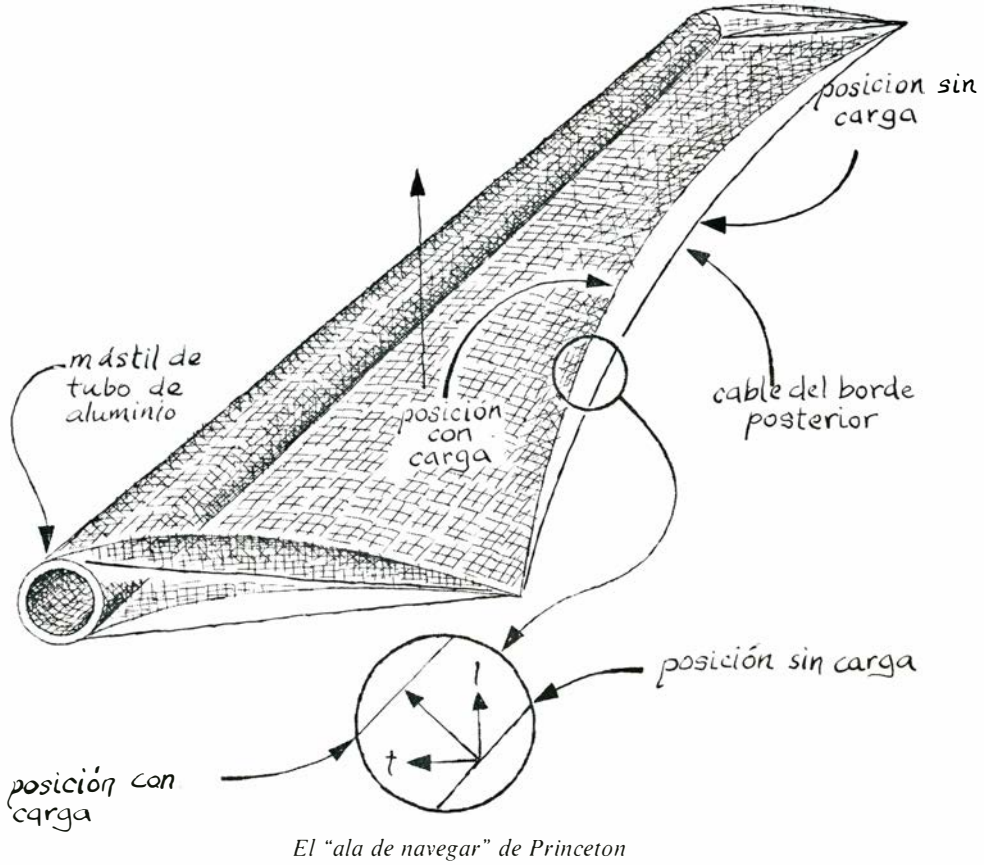
Habiendo observado este desconcertante comportamiento en los modelos pequeños, decidí comprobar personalmente si el fenómeno se presentaría también en planeadores de tamaño natural. Así fue. La primera solución que se me vino a la mente fue incorporar un estabilizador horizontal. Lo intenté con uno, pero aunque funcionó, su comportamiento era extraño y se rompió en seguida con el uso. La solución final consistió en suspender un peso a cierta distancia bajo la quilla del planeador. Este sistema funcionaba bien y no comportaba problemas estructurales.

El esquí aéreo es un arte y sólo puede dominarse únicamente tras una práctica continua. El piloto de estos planeadores ha de ser necesariamente autodidacta. El aparato no tiene un doble mando para el instructor, como en los aeroplanos y planeadores. Se comienza aprendiendo ciertos detalles complementarios sobre las propias facultades físicas, así como la forma de reacción de la cometa a la acción del viento al nivel del suelo, antes de aventurarse –aunque sea por poco tiempo– por los aires. Como los pajarillos, hay que aprender a usar las alas antes de abandonar el "nido".

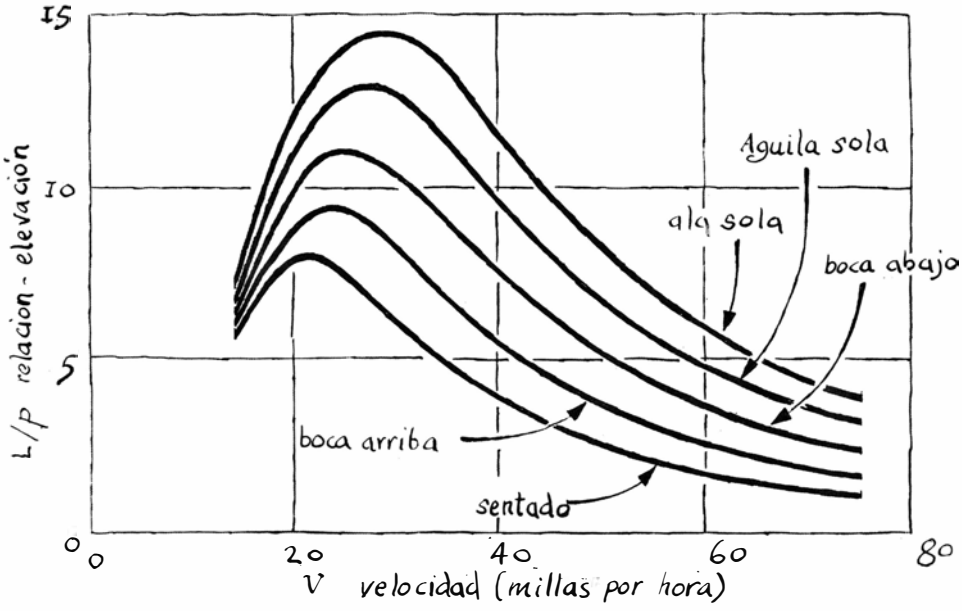
La cometa de Rogallo con la barra de



Respuesta del ala de navegar al ángulo de ataque



El "ala de navegar" de Princeton



Relaciones de elevación-resistencia en un EAGLE III

control y un aparejo seguro puede volar casi en cualquier sitio en que haya una pendiente adecuada que enfrente los vientos dominantes. Se encarece al principiante que comience su adiestramiento al pie de una pequeña colina cubierta de hierba o de una duna de arena con una inclinación de unos 25 grados. Es necesario que haya una brisa ascendente y continua de unos 15 kilómetros por hora. Conviene cerciorarse de que la brisa carece de ráfagas, ya que éstas pueden arrojarlo contra el suelo o bien elevarlo súbitamente 6 metros o más.

Cuando haya ensamblado la cometa cerca del pie de la pendiente, colóquela situando el pico en tierra y en dirección al viento. Dése una vuelta alrededor de la cometa comprobando una a una las partes metálicas para asegurarse de que están bien unidas y que no están dobladas, rotas o agrietadas. Al mismo tiempo compruebe la tela por si tiene agujeros, roturas o jirones. Asegúrese de que todos los puntos de amarre de la tela estén sanos y que los ojales metálicos no se hayan salido. Todos los aparejos deben estar lo suficientemente tirantes como para que restallen al estirarlos.

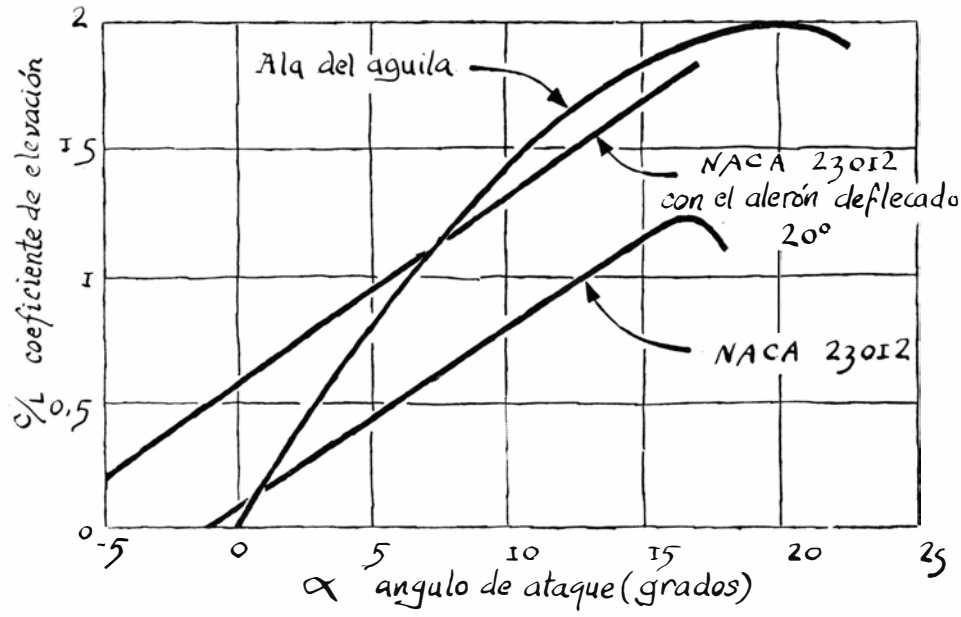
Cuando haya inspeccionado el planeador tome las barras verticales del sistema de control, levante la cometa por encima de su cabeza y corra apuntando contra el viento. Cuando vaya corriendo mueva el pico de la cometa hacia arriba y hacia abajo formando ángulos cada vez mayores, para notar qué efecto se siente. Al levantar el pico, hará que la tela se infle, recoja más viento y tire hacia arriba, con lo cual le costará más trabajo correr. Al bajar el pico, ocurre el efecto contrario: se quiebra la resistencia del viento y se podrá así correr más de prisa. Tenga en cuenta, sin embargo, que si baja demasiado el pico hará que la vela orce, con lo cual el viento actuará sobre la parte alta de la misma y empujará el aparato hacia abajo.

Continúe practicando a ras del suelo hasta que pueda predecir con certeza y "sentir" exactamente cómo las "alas" reaccionan a los distintos ángulos a los que usted sostenga la cometa. Cuando haya conseguido lo anterior, átese con las correas al aparato y continúe practicando hasta que el aparejo se le haga familiar.

En este momento puede comenzar a subir por la pendiente. Al principio, sin embargo, llegue hasta una elevación de sólo un metro aproximadamente. *Mantenga siempre el pico de la cometa apuntando directamente contra el viento,* incluso cuando suba con la cometa cuesta arriba. Conforme adquiera destreza, el viento le ayudará a subir la pendiente. Cuando corra cuesta abajo mantenga el armazón de control cerca del fondo, de manera que los montantes pasen cerca de sus hombros.

Por último, desde una elevación de 3 o 4 metros, comience a correr hacia abajo con la vela ligeramente inflada. Según vaya adquiriendo velocidad, empuje el armazón de control apartándolo un poco, elevando así el pico de la cometa. Si ha alcanzado velocidad suficiente notará que usted y la cometa se elevan por los aires. De lo contrario, sólo se frenará su carrera; en cuyo caso continúe hasta que durante la misma logre la correcta combinación de velocidad y ángulo de ataque para volar. Pronto estará rasando el suelo.

Una vez que haya conseguido volar, mantenga el equilibrio entre la proa y la popa desplazando su peso. Empuje contra la barra de control para mover su cuerpo hacia atrás, lo cual aumentará el ángulo de ataque, disminuyendo



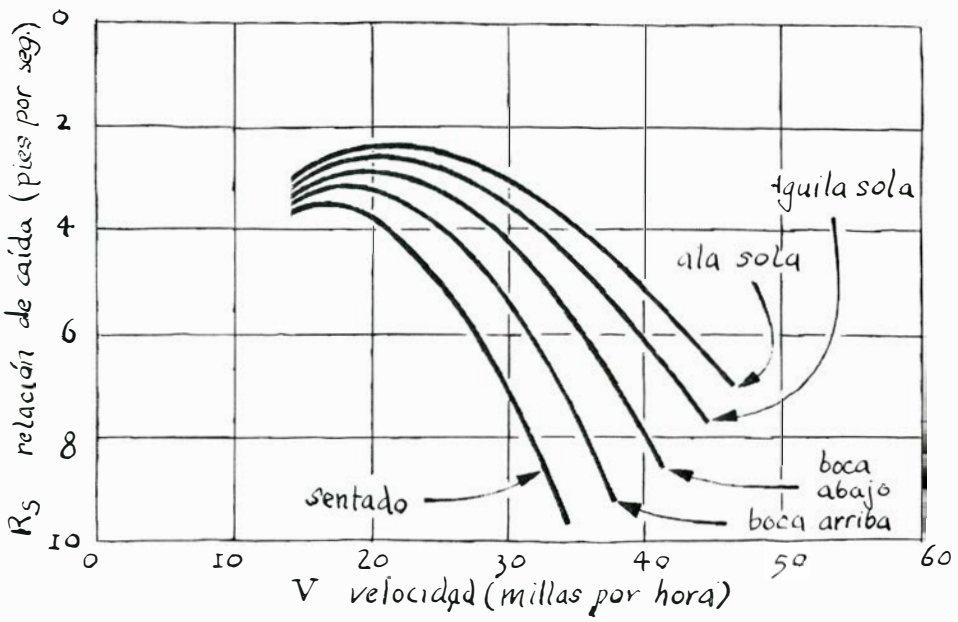
Características aerodinámicas de varias alas

así su velocidad. Tire de la barra de control para llevar su cuerpo hacia adelante, y disminuirá el ángulo de ataque e incrementará su velocidad. Mueva su cuerpo hacia la derecha ejerciendo una fuerza lateral contra la barra de control y hará que la cometa gire a la derecha; haga lo propio hacia el otro lado y obligará a que gire a la izquierda.

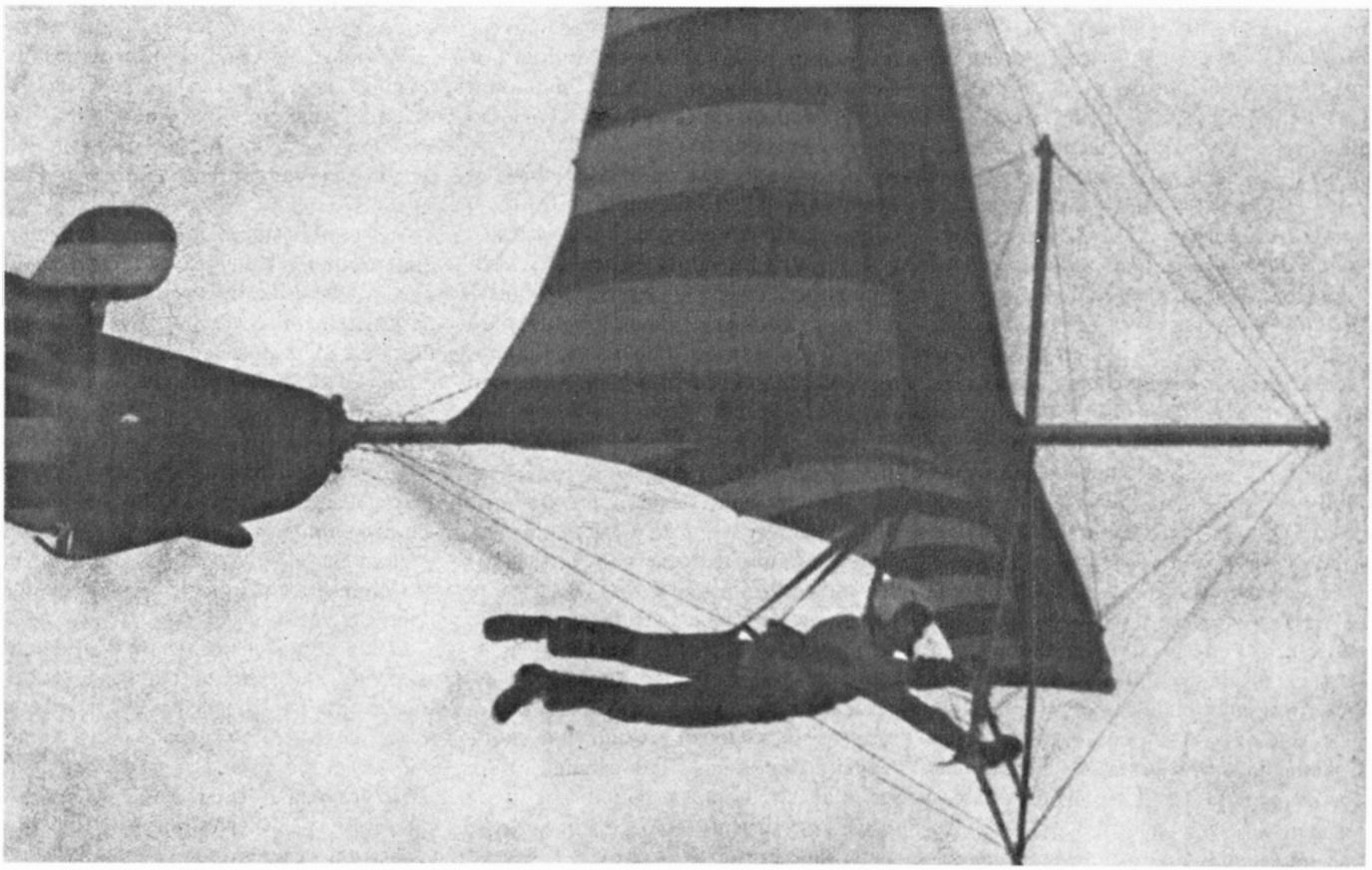
Cuando esté haciendo "esquí aéreo" a sólo un metro por encima de la superficie, recuerde que es mejor equivocarse en mantener el pico de la cometa alto y volar con excesiva lentitud que ponerlo hacia abajo, lo cual hará que el aparato caiga en picado exponiéndose a chocar bruscamente contra el suelo. Continúe practicando cerca de la base de la colina hasta que hacer vuelo rasante sobre el suelo le resulte tan natural como andar. Cuando haya conseguido esto, practique más y vaya subiendo gradualmente hasta la cumbre.

Concéntrese primero en aprender a mantener el equilibrio entre la proa y la popa, esto es, a cabecear. Si su aparato comienza a desviarse oblicuamente hacia un lado, descienda despacio y aterrice en cuanto pueda, para evitar ser arrastrado por la pendiente. Cuando haya conseguido dominar los movimientos de balanceo de proa y de popa, comience a practicar los giros. Sus primeros giros deberán ser tranquilos, suaves y de gran radio. Desplace su peso empujando muy suavemente hacia un lado las barras de control.

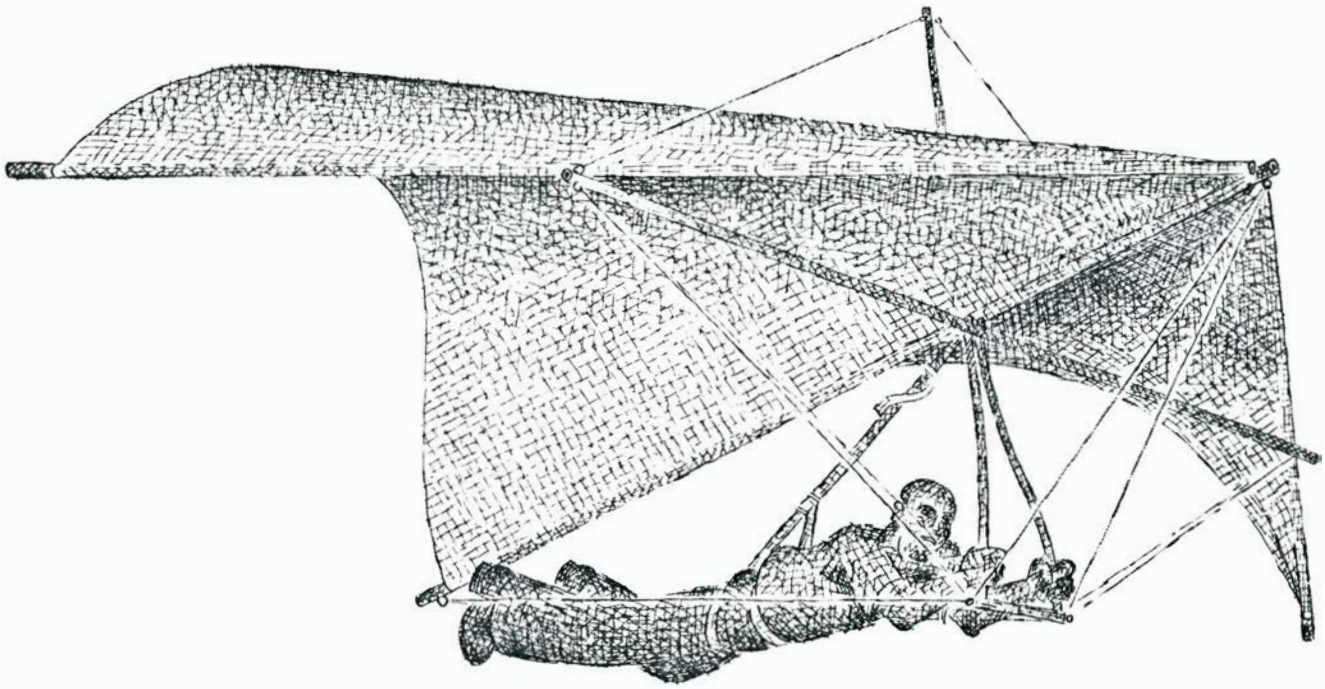
Los giros determinan que la cometa pierda altura más rápidamente que cuando se vuela en línea recta. Esto se puede compensar incrementando ligeramente el ángulo de ataque durante el giro. Evite levantar el pico de la cometa; no vaya a ser que coja un ángulo tal que haga que el planeador se detenga, pierda



Indice de descenso vertical del EAGLE III



Volando boca abajo



La cometa de Rogallo modificada

velocidad de vuelo y caiga al suelo. El ángulo de ataque óptimo sólo se descubre tras muchos intentos.

Conforme haya progresado hacia mayores altitudes tendrá ocasión de hacer piruetas y de maniobrar en las tres dimensiones del espacio, pero no precipite su aprendizaje. De un modo u otro se ha venido diciendo que la cometa de Rogallo es un aparato excepcionalmente seguro; de hecho, su seguridad es sólo relativa. Aerodinámicamente, el ala se caracteriza por la suavidad de su entrada en pérdida; es decir, cuando la cometa comienza a perder velocidad en vuelo, tiende a asentarse rápidamente, bajando la cabeza despacio en lugar de descender en picado. Su comportamiento se rige por las mismas leyes físicas que afectan a las demás máquinas voladoras.

Con la cometa Rogallo resulta más fácil volar que con otros aparatos, ya que el piloto controla el vuelo balanceando su propio cuerpo, acción que es más o menos instintiva. Sin embargo, el balanceo del cuerpo como técnica de control tiene sus limitaciones; ya que las fuerzas que se emplean para controlar son constantes mientras que las fuerzas perturbadoras varían con el cuadrado de la velocidad. Los controles aerodinámicos semejantes a los creados por los hermanos Wright permiten volar seguro en unas condiciones de viento en las cuales sería peligroso hacerlo con un planeador suspendido del tipo Rogallo. En otras palabras, las alas tipo Rogallo no son ningún juguete y pueden resultar mortales. Muchos principiantes no saben cómo aterrizar con seguridad cuando entran en pérdida a una altura de, por ejemplo, 12 metros. Esta maniobra puede y debe aprenderse practicando con paciencia.

Tanto la carga alar como la velocidad del aire son factores importantes en el comportamiento de todos los aparatos voladores. Teniendo en cuenta estas limitaciones, diseñé una serie de planeadores, basados en el ala de Rogallo, para pilotos con un peso de 45 a 95 kilogramos. Los planeadores podían volar con vientos de velocidades comprendidas entre menos de once y más de 32 kilómetros por hora. En general, los aparatos tienen una relación máxima de planeo de alrededor de 4,5:1 y una velocidad mínima de descenso vertical de 137 metros por minuto.

Aunque se puede disfrutar mucho con un planeador de estas características, la duración de los vuelos está limitada necesariamente a minutos más que a horas. A este respecto, planear con un ala Rogallo es comparable a cabalgar sobre las olas en la playa con un patín de "surf". Se disfruta sólo con la serie de viajes de regreso.

Buscaba un planeador de mejores características que me permitiese volar continuamente a lo largo de pendientes del lado del viento, y en ambos sentidos, haciendo giros de 180 grados en los extremos. También quería disfrutar de estas mejoras con un mínimo de problemas, lo cual significaba elaborar una máquina que una persona pudiera no sólo montar y desmontar, sino también plegar y cargar sobre un automóvil para su transporte.

Me vino a la mente una invención que prometía hacer posible tal planeador, al recordar un curso universitario de aerodinámica de bajas velocidades. Durante el mismo se describió un "ala de navegar" que había sido desarrollada en la Universidad de Princeton en 1948. Dicho dispositivo se había diseñado como vela perfeccionada para barcos. En 1952 se la adaptó para su posible empleo como superficie auxiliar de elevación en vehículos que levitan por la reacción de chorros de aire arrojados contra el suelo.

El ala de navegar consiste básicamente en un mástil tubular que soporta el borde anterior de una envoltura de tela y un juego de botavaras cortas y rígidas en el pie y en la punta del mástil, entre los cuales se tensa un cable fino que forma el borde posterior del ala. La estructura puede plegarse y guardarse.

La aerodinámica del ala de navegar es, a la vez, simple e impresionante. Su comportamiento se aproxima al de las clásicas alas rígidas en lo que respecta a sustentación y resistencia aerodinámica. A un ángulo de ataque nulo, cuando el plano del ala de navegar coincide con el plano de su movimiento, el ala de navegar adopta una sección transversal simétrica que no proporciona elevación. Al aumentar el ángulo de ataque, las superficies del ala asumen una forma combada que proporciona un empuje ascendente. Además, esta comba se hace más pronunciada al aumentar el ángulo de ataque, efecto aerodinámico equivalente al producido por un alerón automático de ala. Un gráfico muestra que la fuerza ascensional resultante del ala tiene una pendiente más pronunciada hacia arriba que la de un ala "rígida" clásica.

El principal factor que determina el coeficiente de planeo de un avión es la relación entre la longitud del ala y su anchura. Esta relación se denomina coeficiente aparente. Sería incorrecto afirmar que al doblar el coeficiente aparente de un ala se dobla también el coeficiente de planeo de un avión, pero al aumentar el coeficiente aparente se mejora en gran medida el coeficiente de planeo. (Dicho sea de paso, el coeficiente de planeo es numéricamente igual a la relación entre elevación y resistencia aerodinámica. El coeficiente de resistencia aerodinámica inducida es igual a $C_D = C^2_L / \pi AR$, en donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica, C_L es el coeficiente de elevación y AR es el coeficiente aparente, que es igual a la longitud del ala dividida por su cuerda media o anchura.)

Después de revisar las tablas de características aerodinámicas de varios cientos de alas, llegué a la conclusión de que con un ala de baja velocidad el coeficiente de elevación debería aumentar a razón de aproximadamente el 7,5 por ciento del ángulo de ataque; que la pérdida de sustentación debería empezar a ser notoria a un coeficiente de elevación de 1,6; que cuanto mayor sea el diámetro del borde anterior más suave será la pérdida de sustentación y mayor el coeficiente de elevación; cuanto más profunda sea la comba, mayor será el coeficiente de elevación, y que el ápice de la comba debería distar del plano más de un tercio de la distancia entre el borde anterior del ala y el posterior.

Observé, con cierta sorpresa, que estas características describían exactamente los resultados de pruebas experimentales realizadas en el ala de navegar, según informes de Princeton y la NASA. Estaba claro que en el ala de navegar se daban buenas características en una estructura simple y plegable que debería funcionar como la superficie de elevación del planeador definitivo.

Rápidamente construí e hice volar una serie de modelos a escala, algunos de los cuales eran controlados por radio. El primer prototipo, al que llamé "EAGLE I", tenía una envergadura de 12 metros y pesaba 32 kilogramos. El ala descansaba en un plano simple, esto es, no formaba un ángulo diedro curvado hacia arriba. Su coeficiente aparente era 8:1, su área medía 18,58 metros cuadrados y no tenía inclinación hacia atrás. La cola estaba dotada con un timón clásico, un timón de altura y un estabilizador horizontal. Para el control lateral sustituí los alerones por deflectores aerodinámicos, que podían levantarse mediante cables de control para crear una resistencia aerodinámica en las proximidades de cualquiera de los dos extremos del ala.

Las primeras pruebas de tierra y de "inflamiento de vela" se realizaron siguiendo el mismo procedimiento que se aplica para aprender a volar con un ala de Rogallo. Cuando una ligera brisa elevaba la máquina, el ala de navegar tomaba exactamente el perfil esperado. Las pruebas de vuelo comenzaron en dunas bajas. Los primeros vuelos rasantes en tierra indicaron que el timón de altura proporcionaba un perfecto control del cabeceo; también me sirvieron para desplazar el arnés de suspensión hasta su punto de equilibrio correcto. El timón resultó ser de cierta utilidad para controlar el derrape, pero los deflectores aerodinámicos eran inútiles. La tela de las superficies de control se distorsionaba mucho bajo la carga, lo cual hacía necesario un nuevo diseño.

Por lo demás, EAGLE I era totalmente estable en vuelo y tenía un coeficiente de planeo de cerca de 10:1. Aun cuando aumenté el tamaño de los deflectores en un 50 por ciento, la modificación nunca fue sometida a prueba. Una inspección crítica del aparato indicó que se podían introducir numerosas simplificaciones de diseño en la construcción de su estructura. Decidí conseguir un control lateral por el sistema usado por los hermanos Wright, a saber, el alabeo del ala. El resultado fue un aparato de diseño mucho más limpio, que pesaba 28,6 kilogramos.

Las pruebas de vuelo demostraron que el aparato era un planeador de excelentes características. Di una zancada mientras me enfrentaba a una brisa de 16 kilómetros por hora, tiré de la barra de control y me elevé casi verticalmente. La sensación fue fantástica. Sin embargo, el sistema de control lateral seguía siendo ineficaz. Resultaba obvio que la envergadura y el área del ala eran excesivamente grandes para manejarlas en cualquier situación que no fuera de calma absoluta.

Las pruebas y modificaciones posteriores condujeron a la construcción del EAGLE II. Esta máquina pesaba 34 kilogramos y tenía una envergadura de 10,36 metros; el ala tenía una superficie de 14,68 metros cuadrados. La supresión de unos cuantos pernos hizo posible el que se pudiera plegar fácilmente el avión para su transporte en el techo de un coche. El EAGLE II tenía un juego de poleas, cables y una barra de control que permitía al típico piloto de cometa adaptarse fácilmente a este aparato de tan altas características. El ala, con un coeficiente aparente de 7,25:1, carecía de inclinación hacia atrás. En la prueba desarrolló un coeficiente de elevación superior a 2, con una suave pérdida de sustentación. La pérdida de sustentación podría describirse más correctamente como "blanda", esto es, un descenso al estilo de un paracaídas. Cuando se accionaba la barra de control hacia atrás, el ángulo de ataque y la comba del ala aumentaban simultáneamente. El resultado de esa acción era un descenso pronunciado aunque lento. La respuesta a los controles seguía siendo buena hasta entrar en pérdida, pero era lenta para la guiñada o derrape en la condición "blanda" de pérdida.

El EAGLE II tenía un estrechamiento gradual del ala de 3:1 y un ángulo diedro de 8 grados. Al principio equipé el aparato para un ángulo diedro de sólo 2 grados, pero tendía a deslizarse demasiado en el derrape. También fijé en 2 grados el alabeo negativo en las puntas de las alas para evitar la pérdida de sustentación en los extremos (los extremos de las alas están torcidos para reducir el ángulo en 2 grados). La resistencia de la estructura se comprobó con una carga equivalente a 6 veces la fuerza de la gravedad, con un factor de seguridad de 1,5.

La estructura de la cola consistía en un bastidor de tubo de aluminio que soportaba la tela de nylon irrompible. Con el tiempo se hizo evidente que este material se estiraba demasiado; con la comba exagerada resultante, disminuía

el coeficiente de planeo. Como ya he dicho, ahora utilizo una tela de Dacron estabilizado.

Tanto el timón clásico como el timón de altura estaban equilibrados aerodinámicamente, esto es, estaban abisagrados un poco por delante de un cuarto de la cuerda de la superficie de mando. El estabilizador horizontal y el timón de altura podían desmontarse como una sola pieza de la quilla de la armadura. Las fuerzas desarrolladas por el timón y por la estructura en ángulo diedro del ala se combinaban para producir un par de derrape-balance que ayudaba a girar fácilmente. Las estructuras articuladas de tubo de aluminio cubierto que formaban las puntas de las alas alabeaban ambas las alas y servían como alerones. Las llamé "alaberones". Acopladas directamente al timón, deflectaban diferencialmente los extremos de las alas justo lo necesario para producir giros coordinados.

Ya se han realizado pruebas de vuelo exhaustivas del EAGLE III. En teoría, el máximo coeficiente de planeo de la máquina sin piloto es bastante más que 10:1. Naturalmente que esta característica se pierde en parte con la presencia del piloto, que crea fuerzas de resistencia aerodinámica pero no de elevación. La cantidad de resistencia que introduce el piloto depende de su posición. Los cálculos indican que cuando el piloto vuela tendido boca abajo el coeficiente de planeo del EAGLE III se aproxima a 11:1. En la posición de sentado es casi de 8:1. Estos valores suponen una velocidad aerodinámica óptima de unos 43 kilómetros por hora. La velocidad de descenso vertical también varía según la magnitud de la resistencia creada por el piloto: es de unos 61 metros por minuto. Las características del EAGLE III son, por tanto, compatibles no sólo con un vuelo sostenido en playas con pendiente situada a barlovento y demás terrenos similares, sino también con un planeo por todo terreno.

El EAGLE III es esencialmente un monoplano ultraligero, de altas características con un ala de comba variable. El piloto puede hacer que el aparato entre en pérdida en vuelo, pero dicha pérdida es suave comparada con la de un ala normal como la NACA 23012. Los principiantes no deberían intentar volar un EAGLE III, pero los pilotos que hayan llegado a dominar el planeo suspendido con una cometa de Rogallo se adaptan muy fácilmente a este aparato de altas características.

Taller y laboratorio

El campo eléctrico de la tierra aporta energía a los motores electrostáticos

C. L. Stong

Nadie puede fabricar un móvil perpetuo, pero cualquiera puede emplear el campo eléctrico de la tierra para hacer funcionar ininterrumpidamente un motor casero. El campo existe en la atmósfera, entre la superficie de la tierra y la ionósfera, siendo su potencial eléctrico de alrededor de 360.000 voltios. La energía almacenada se estima entre un millón y mil millones de kilovatios.

Es esta una forma de energía que no puede utilizarse para alimentar, directamente, un motor eléctrico ordinario. Tales motores desarrollan un par mecánico mediante la interacción de campos magnéticos generados por una corriente eléctrica de gran intensidad y baja tensión, como lo demostró Michael Faraday en 1821. El campo de la tierra suministra una corriente continua de intensidad relativamente pequeña, a alta tensión; esta corriente es ideal para hacer funcionar los motores electrostáticos, similares en principio a la máquina inventada por Benjamin Franklin en 1748.

Los motores de este tipo están basados en las fuerzas de atracción entre cargas eléctricas de distinto signo y las de repulsión entre cargas del mismo signo. La energía del campo puede obtenerse mediante una antena sencilla, en forma de conductor vertical, que esté provista de una o varias puntas agudas en su extremo superior. Con buen tiempo, y para alturas de hasta unos cientos de metros, el potencial de la antena aumentará a razón de 100 voltios por cada metro de distancia vertical entre las puntas y la superficie de la tierra. A alturas mayores la tasa de aumento del potencial es menor. Cuando se producen tormentas locales el potencial captado por la antena puede ser de miles de voltios por metro. Una hipótesis meteorológica es que el campo lo mantienen, principalmente, las tormentas, ya que éstas arrancan electrones del aire y lo inyectan dentro de la tierra por medio de rayos, que alcanzan la superficie de ésta con una tasa de 200 descargas por segundo como promedio.

¿Por qué no explotar este campo para complementar las fuentes de energía convencionales? Antes deben vencerse algunas limitaciones. Por ejemplo, una punta aguda sencilla puede atraer carga eléctrica del aire que la rodea con una intensidad de alrededor de una millonésima de amperio, solamente. Podría esperarse que una antena que conste de una sola punta situada en lo alto de un hilo de 18 metros suministrase alrededor de un microamperio a 2000 voltios; la potencia equivalente es 0,002 vatios. Puede preverse que un globo, tachonado de puntas, sujeto mediante un hilo a una altura de 75 metros proporcionará 0,075 vatios. Una limitación importante aparece cuando la altura de la antena excede de unos 200 metros. Las tensiones correspondientemente mayores se hacen difíciles de mantener confinadas.

A una altitud de 200 metros la antena debería captar unos 20.000 voltios. El aire conduce razonablemente bien a esta tensión. En la naturaleza se encuentran materiales magnéticos eficientes, tales como el hierro, el níquel, y el cobalto, que explican por qué la industria de la energía eléctrica se ha desarrollado en base a la dinamo magnética de Faraday. No existen, sin embargo, sustancias aislantes de una eficacia comparable que permitan aislar las altas tensiones que se requerirían en una máquina electrostática de potencia comparable. A pesar de ello, los motores electrostáticos, que son considerablemente más fáciles de construir que los electromagnéticos, pueden encontrar aplicación en casos especiales, tales como aquellos en los que el magnetismo deba excluirse o cuando se trate de suministrar una potencia pequeña a aparatos instalados en lugares remotos, sin operarios, utilizando el campo terrestre.

Aparte de sus posibles aplicaciones, los motores electrostáticos constituyen juguetes fascinantes. En los últimos años, Oleg D. Jefimenko y sus alumnos, de la Universidad de West Virginia, los han estudiado extensamente. El grupo ha reconstruido los modelos de motores de Franklin y desarrollado máquinas electrostáticas avanzadas de otros tipos.

Aunque Franklin no dejó planos de su motor, su descripción del mismo, en una carta a Peter Collison, miembro de la Royal Society, ha permitido a Jefimenko reconstruir un modelo capaz de funcionar *(véase la ilustración que está en la página opuesta)*.

La máquina consiste, esencialmente, en una rueda sin llanta que gira en un plano horizontal sobre cojinetes con un bajo coeficiente de rozamiento. Cada rayo de la "rueda eléctrica", como Franklin denominaba a la máquina, consiste en una varilla de vidrio con un dedal de bronce en su punta. Para accionar el motor se almacenaba una carga electróstatica en botellas de Leyden. Una botella de Leyden es una versión primitiva de un condensador moderno de alta tensión. Franklin cargaba sus botellas con un generador electrostático.

Los terminales de alta tensión de dos o más botellas de Leyden, que poseían cargas de polaridad opuesta, se situaban de manera que fuesen rozados por los dedales situados en lados opuestos de la rueda giratoria. El motor se arrancaba a mano. A partir de esto, desde cada terminal saltaba una chispa de alta tensión a cada dedal que iba pasando y le transmitía una carga de la misma polaridad que la del terminal. La fuerza de repulsión entre cargas del mismo signo impartía un momento de fuerza a la rueda.

Recíprocamente, los dedales eran atraídos por los electrodos, con carga de distinto signo, de la botella de Leyden que Franklin colocaba en el lado opuesto de la rueda. A medida que los dedales rozaban esa botella, una nueva chispa volvía a transferir carga, esta vez de polaridad opuesta. Los dedales resultaban así empujados y atraídos simultáneamente por los terminales de alta tensión del modo necesario para acelerar la rueda.

Franklin no estaba totalmente satisfecho de su motor. La razón era porque, para hacerlo funcionar, se requería, en sus propias palabras, "una fuerza ajena, a saber, la de las botellas". Hizo una segunda versión de la máquina sin las botellas de Leyden.

En este diseño, el rotor consistía, prin-

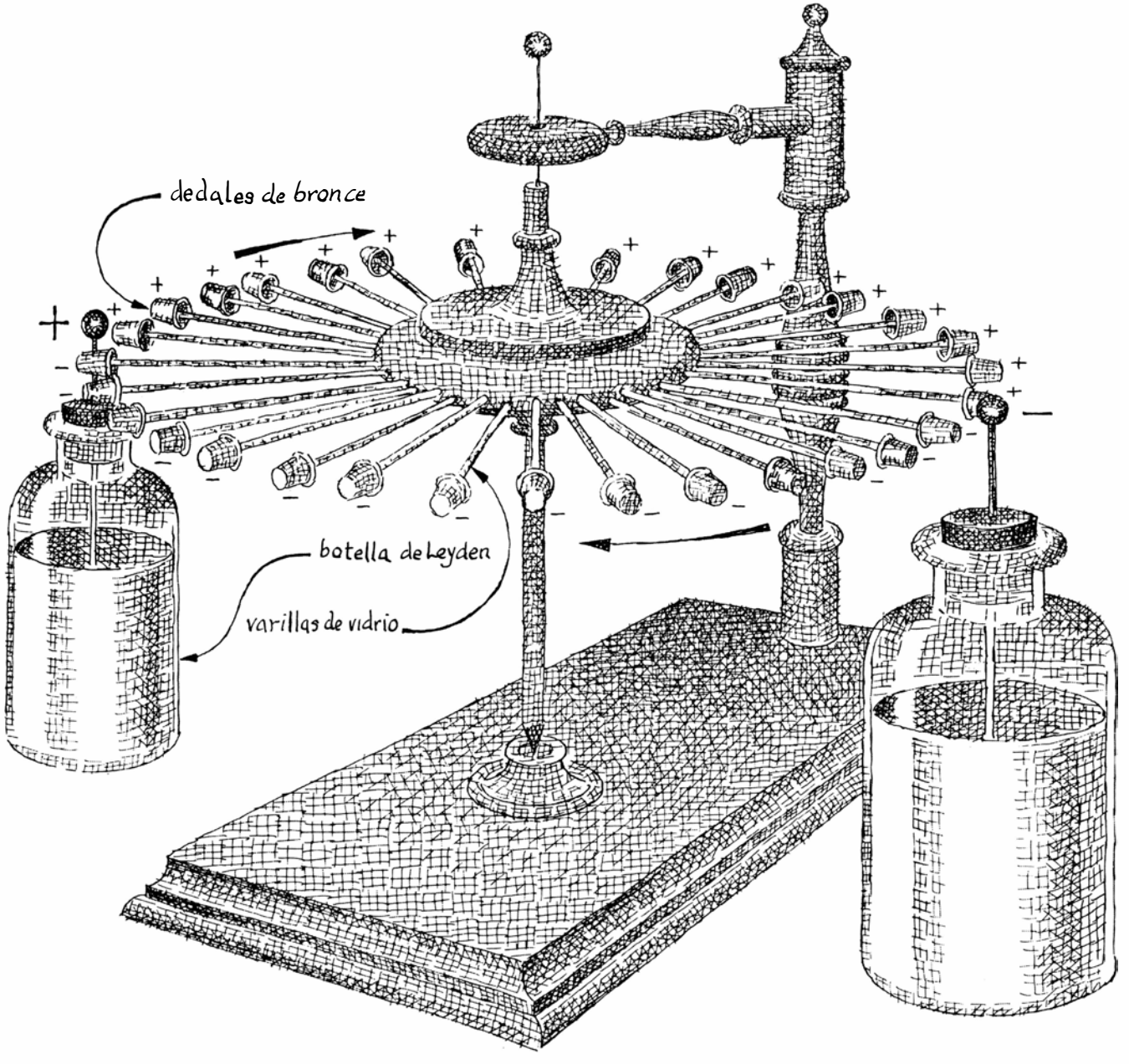
cipalmente, en un disco de vidrio de 43 centímetros de diámetro, montado sobre cojinetes de escaso rozamiento, y que giraba en un plano horizontal. Ambas caras del disco estaban cubiertas de una película de oro, excepto en una región cercana al borde. El rotor estaba construido de forma muy parecida a la de un moderno condensador de armaduras planas.

Doce esferas equidistantes, cementadas al borde del disco, estaban conectadas alternativamente a las películas de oro de las caras superior e inferior. Doce dedales fijos, sostenidos por columnas aislantes, se distribuían alrededor del disco, de forma que rozasen las esferas giratorias de metal. Cuando Franklin cargaba con signo contrario las capas de oro superior e inferior e impulsaba el rotor, la máquina funcionaba tan bien como la de su primer diseño y por las mismas razones. Según Franklin, esta máquina alcanzaba las 50 revoluciones por minuto y funcionaba durante 30 minutos con una sola carga.

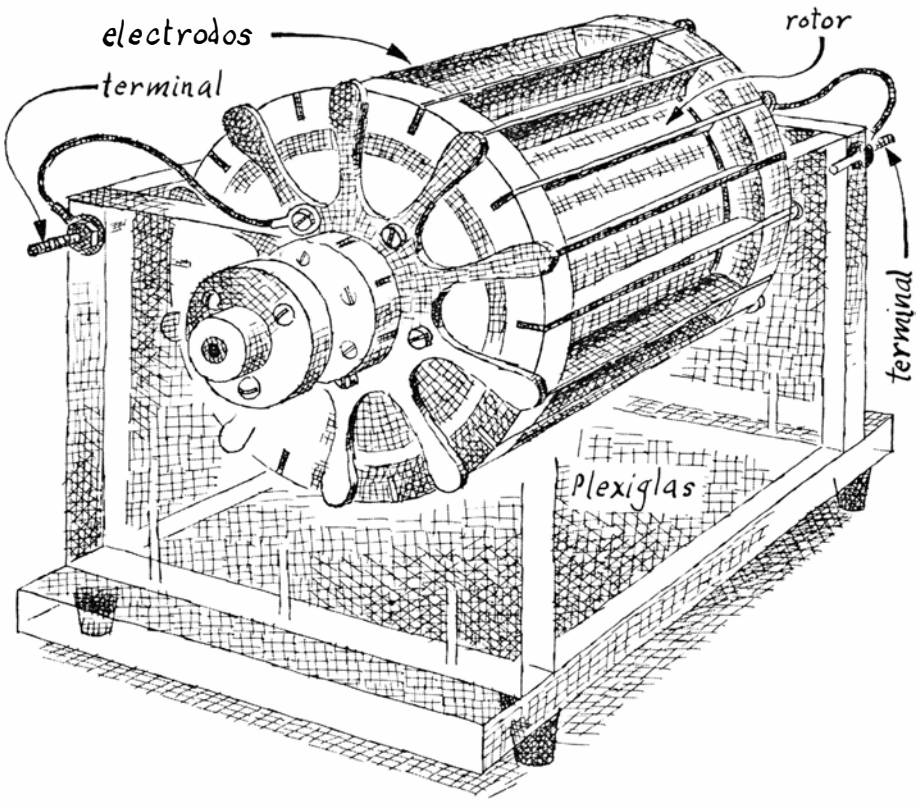
Jefimenko da a ambos motores una carga inicial empleando un generador de 20.000 voltios. Su consumo de corriente es de alrededor de una millonésima de amperio cuando funcionan a toda velocidad. Este consumo equivale a 0,02 vatios, que es la potencia requerída para levantar un peso de 20 gramos a una altura de 10 centímetros en un segundo.

Jefimenko se preguntaba si el motor de Franklin no podría hacerse más potente. Como él mismo explica, la fuerza puede aumentarse añadiendo electrodos fijos y móviles. Esta estratagema está limitada por el espacio disponible. Si los electrodos se sitúan demasiado próximos, tienden a saltar chispas entre ellos, a lo largo del rotor, produciéndose así de hecho un cortocircuito de la máquina. Como alternativa, el rotor podría hacerse cilíndrico para que llevase electrodos en forma de largas bandas o placas. Este dispositivo podría, tal vez, aumentar 1000 veces la potencia de salida.

Repasando la historia de las máquinas electrostáticas, Jefimenko encontró, por casualidad, un artículo publicado en 1870 por Johann Christoff Poggendorff, físico alemán. Describía un motor electrostático provisto de un rotor sin electrodos. La máquina consistía en un



Motor electrostático de Benjamín Franklin



Motor de efecto corona de Oleg D. Jefimenko

disco de vidrio, sin ningún revestimiento, que giraba en el plano vertical, sostenido por cojinetes de baja fricción, entre dos cruces opuestas de ebonita. Cada brazo aislante de las cruces sostenía una hilera, en forma de peine, de puntas de agujas finas que rozaban el vidrio.

Cuando peines opuestos de caras opuestas del vidrio se cargaban con polaridad de distinto signo a potenciales superiores a los 2000 voltios, el aire próximo a las puntas de ambos lados del vidrio se ionizaba. Un brillo azulado rodeaba las puntas, que emitían un leve sonido siseante. El fenómeno, llamado fuego de San Telmo o bien efecto corona, depositaba cargas estáticas a ambos lados del rotor.

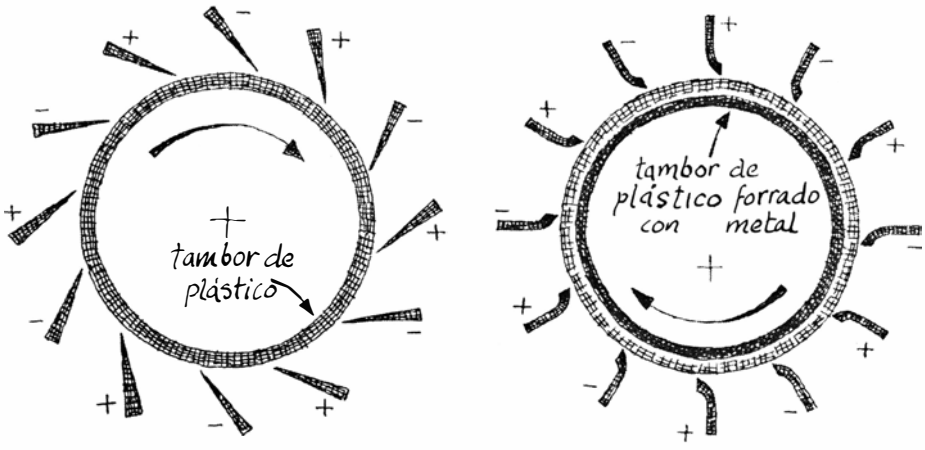
Casi toda la superficie del vidrio adquiría una capa de cargas fijas positivas o negativas, dependiendo de la polaridad de los peines. Las fuerzas de atracción y repulsión entre el vidrio así cargado y los peines eran considerablemente superiores a las que aparecían en los dedales cargados de Franklin. Las fuerzas eran también más regulares ya que las distancias entre los peines y las áreas cargadas permanecían constantes. Debe observarse que los peines adyacentes, en el mismo lado del vidrio, soportan cargas de polaridad opuesta, de tal forma que las fuerzas resultantes de atracción y repulsión actúan al unísono para impartir un momento al disco, tal como lo hacían en el caso del motor de Franklin.

Poggendorff continuó experimentando y llegó a saber que debía inclinar los dientes de los peines para depositar las cargas sobre el vidrio a cierto ángulo. La fuerza asimétrica resultante hacía que el motor fuese unidireccional y de arranque automático. Cuando los dientes estaban perpendiculares a la superficie del vidrio las fuerzas eran simétricas, al igual que en el motor de Franklin. Cuando la máquina se arrancaba a mano andaba igual de bien en cualquier dirección.

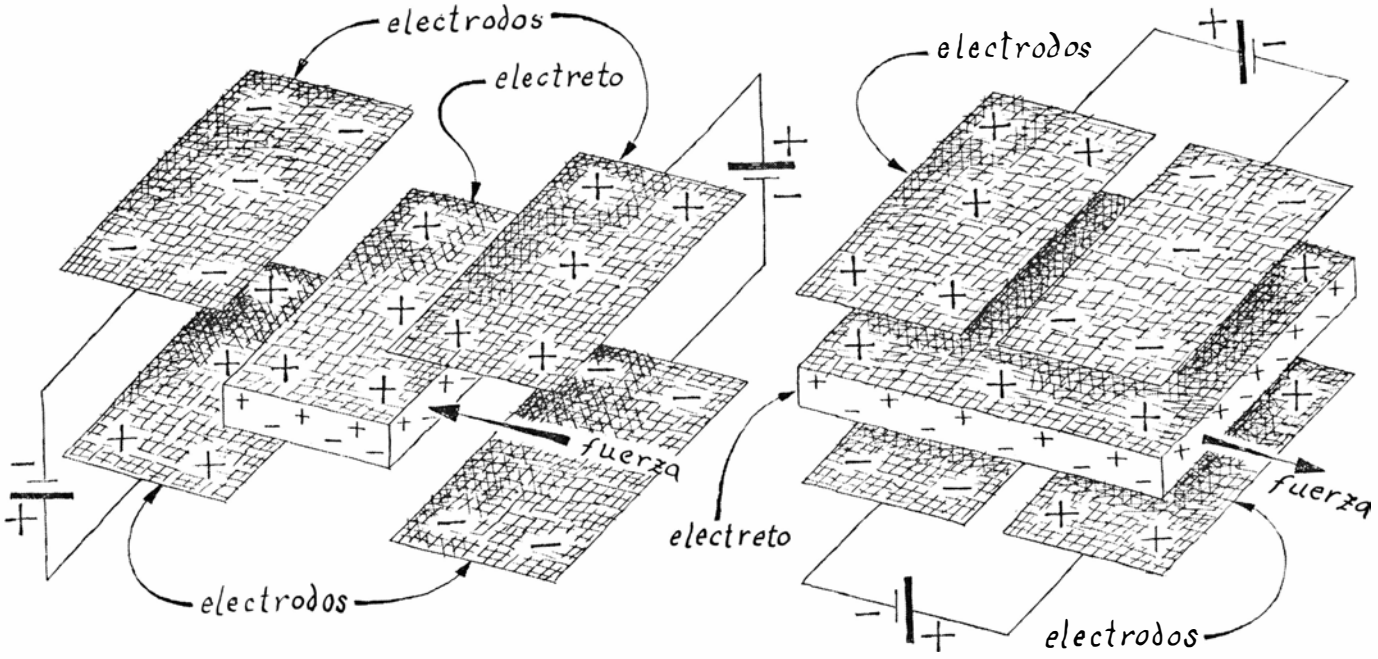
Poggendorff estaba inmensamente complacido por la eficiencia con que su máquina convertía carga en movimiento mecánico. Concluyó su artículo con una referencia algo despectiva al dispositivo de Franklin. "Tal cantidad de electricidad debe producir una fuerza mucho mayor que la que se produce en el asador eléctrico (de Franklin)", escribía, "como es totalmente obvio y, actualmente, no lo negaría ni el mismo Franklin. Con un grano de pólvora no se puede lograr lo mismo que con cuarenta kilos".

Los motores electrostáticos se clasifican ahora, en general, por el procedimiento mediante el cual la carga se almacena en la máquina o se transfiere al rotor. La máquina de Poggendorff pertenece al tipo de las de efecto corona, que son las que más atención han atraído en los últimos años. Aunque su eficiencia medida es mayor del 50 por ciento, Poggendorff lo consideraba tan sólo como un aparato para investigar los fenómenos eléctricos. Escribía que "sería una vana esperanza la de quien quisiese creer que con él podría obtenerse algún efecto mecánico útil".

La actitud negativa de Poggendorff hacia la utilidad de su diseño pudo muy bien retrasar su desarrollo ulterior. Una versión moderna de la máquina, construida en el laboratorio de Jefimenko, tiene una potencia de alrededor de 0,1 CV. Funciona a velocidades de hasta 1200 revoluciones por minuto, con una eficiencia bastante mayor que el 50 por ciento. Uno de los modelos del moderno motor de efecto corona consiste en un cilindro de plástico que gira alrededor de un eje y va instalado dentro de un conjunto concéntrico, formado por electrodos de bordes afilados que distribuyen carga sobre la superficie del cilindro *(véase la ilustración superior de esta página).* Las fuerzas que actúan entre las cargas distribuidas y los electrodos imparten un momento al cilindro.



Electrodos convencionales (**izquierda**) *y electrodos mejorados* (**derecha**)



Motor de electreto de A.N. Gubkin (**izquierda**) *y motor de efecto de ranura* (**derecha**)

Pueden fabricarse máquinas de esta clase con casi cualquier material dieléctrico barato, como son los plásticos, la madera y hasta el cartón. Las únicas partes que han de ser metálicas son los electrodos y sus terminales de interconexión valiendo incluso delgadas hojas metálicas soportadas por cualquier dieléctrico rígido. El eje puede construirse de plástico y girar sobre cojinetes neumáticos. Recurriendo a tales estratagemas los experimentadores pueden proyectar motores extremadamente livianos en relación a su potencia. Los motores de efecto corona no necesitan escobillas ni conmutadores. Se necesita, sin embargo, un potencial de al menos 2000 voltios para iniciar las descargas en corona en los afilados electrodos.

J. D. N. Van Wyck y G. J. Kühn, de Africa del Sur, exhibieron en 1961 una versión más pequeña y más simple de la máquina. Este motor consistía en un disco de plástico de alrededor de tres milímetros de espesor y 40 milímetros de diámetro, sostenido en el plano horizontal por un eje delgado que giraba sobre cojinetes de rubí. Seis puntas de aguja, orientadas radialmente, rozaban el borde del disco a intervalos iguales. Cuando se alimentaba a la máquina, utilizando una fuente de 8000 a 13.000 voltios, se medían velocidades de rotación de hasta 12.000 revoluciones por minuto.

Yo he construido un motor de efecto corona con tubo de plexiglás de 5 centímetros de diámetro y 4 centímetros de longitud. Como electrodos usé cuchillas de afeitar de un solo filo sostenidas por un material rígido. El interior del tubo se forró con papel de aluminio, estratagema ideada en el laboratorio de Jefimenko para aumentar el gradiente de potencial en las proximidades de los electrodos y aumentar así la cantidad de carga que puede depositarse sobre la superficie del cilindro. Recubrí todas las superficies de las cuchillas de afeitar, a excepción de los filos, y todos los hilos de interconexión con "barniz anticorona", un líquido de aspecto parecido al cemento que se seca para formar una sustancia dieléctrica que reduce la pérdida de energía producida por las descargas de corona en aquellas partes del circuito no empleadas directamente en la producción de potencia.

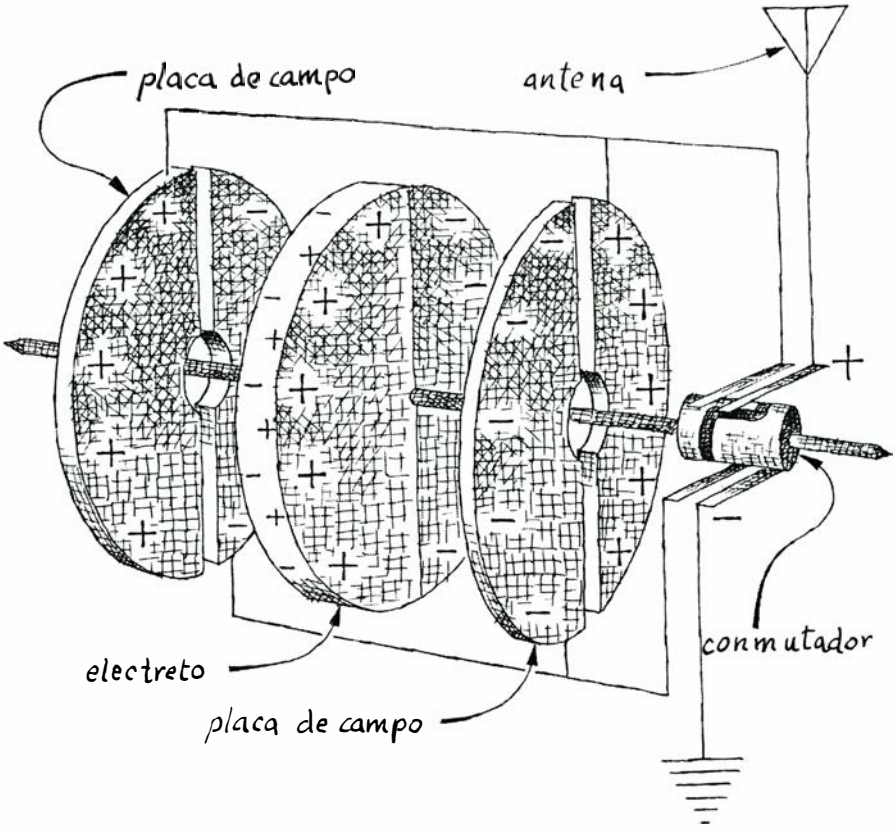
El eje central, que sostiene al cilindro sobre pivotes, se cortó de una aguja de acero para tejer. Los extremos del eje se afilaron y se pulieron hasta convertirlos en puntas de 30 grados. Para formar las puntas, fijé el eje en la mordaza de un taladro eléctrico manual, apliqué al metal una muela lubricada con aceite y pulí los pivotes resultantes contra una muela de madera recubierta de trípoli (sílice pulverulenta).

Los cojinetes que soportan los pivotes se obtuvieron del mecanismo de escape de un reloj despertador desechado. Un par de tornillos de ajuste, dentados, podrían reemplazar a los cojinetes del reloj. El bastidor soporte se fabricó de Lucita (plástico cuyo componente principal es el metilmecrilato polimerizado) de 0,63 centímetros de espesor. El motor puede hacerse de arranque automático y unidireccional inclinando las cuchillas. Quienes construyan la máquina pueden descubrir, como yo lo hice, que la parte más difícil del proyecto, equilibrar el rotor, viene después del montaje. El rotor debe equilibrarse estática y dinámicamente.

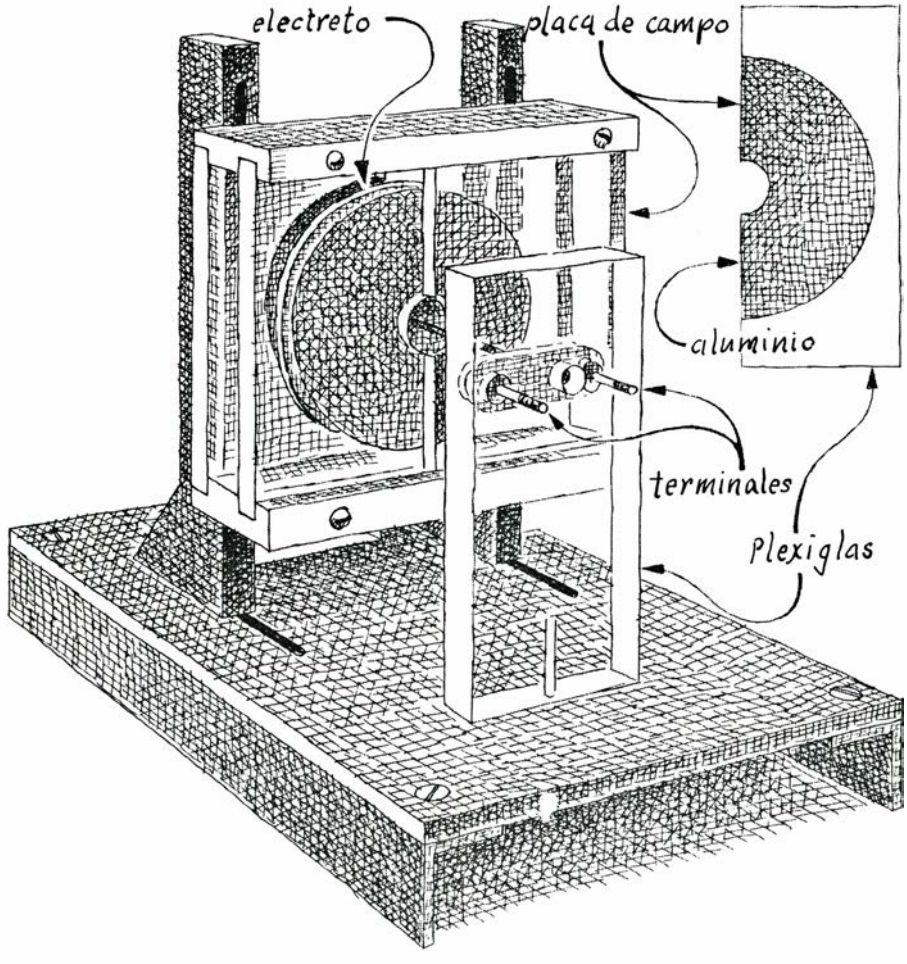
El equilibrado estático se consiguió, experimentalmente, añadiendo trozos pequeños de cinta adhesiva a la superficie interna de la lámina de aluminio que recubre el cilindro, hasta que el rotor permaneció sin moverse en cualquier posición en la que se le colocaba a mano. Cuando el rotor estuvo equilibrado se aplicó potencia; el motor adquirió rápidamente velocidad, pero con sacudidas violentas. Yo había corregido el desequilibrio causado por un exceso de pegamento en un extremo del rotor añadiendo un contrapeso en el lado opuesto del otro extremo del cilindro. Las fuerzas centrífugas en los extremos quedaron desfasadas en 180 grados, constituyendo así un par.

El equilibrio dinámico, que se consigue en gran medida mediante aproximaciones sucesivas, ocupa casi tanto tiempo como el resto de la construcción. Para comprobar el equilibrio dinámico, suspéndase el motor libremente con una cuerda, hágase girar a baja velocidad y júzguese por las oscilaciones dónde debe añadirse un contrapeso. La cinta adhesiva es un material de contrapeso adecuado ya que puede colocarse y desplazarse con facilidad.

Hice el motor tan ligero y libre de rozamientos como fue posible con el fin de



Circuito de motor de electretos de efecto de ranura



Motor de electretos de efecto ranura de Jefimenko

hacerlo funcionar con energía procedente del campo de la tierra. La energía se obtenía del campo mediante una antena de 8 metros de alambre trenzado, calibre núm. 28, aislado con plástico. En la clase de alambre empleado normalmente para interconectar los componentes electrónicos y puede adquirirse en establecimientos de artículos para radio.

La parte superior del hilo se conectó a un oropel metálico de 6 metros de longitud, del tipo de los que se emplean para decorar los árboles de Navidad. El oropel funciona como si fuese un conjunto de muchas puntas de aguja. Unas tiras cortadas de persianas metálicas para ventanas funcionarían sin duda igualmente bien.

El extremo superior del oropel se mantuvo en alto mediante un conjunto de tres globos meteorológicos, de 0,9 metros de diámetro cada uno, y rellenos de helio. El peso en kilogramos que puede levantar un globo de forma esférica, lleno de helio, es, aproximadamente, igual a cuatro veces el cubo de su radio expresado en metros. Para mi satisfacción, el motor comenzó a andar lentamente cuando el oropel alcanzó una altura de alrededor de 30 metros. A los 90 metros el rotor giraba a una velocidad entre 500 y 700 revoluciones por minuto.

Llegados a este punto, hay que hacer una advertencia. Aunque una antena vertical de 90 metros puede manejarse sin peligro con buen tiempo, puede adquirir una carga mortal durante las tormentas. Franklin tuvo una suerte increíble al sobrevivir después de su famoso experimento de la cometa. Un investigador europeo que trató de repetir las observaciones de Franklin fue muerto por un rayo. La antena de hilo de 90 metros puede adquirir carga suficiente para dar a una persona una descarga importante, incluso durante el buen tiempo. Siempre debe ponerse a tierra el extremo inferior del hilo cuando no esté alimentándose ninguna carga, tal como el motor.

Para hacer funcionar el motor, conéctese la antena a un conjunto de electrodos y póngase a tierra el otro. No conecte la antena a un objeto aislado de tamaño considerable, tal como un automóvil. Puede acumularse una carga peligrosa. No eleve nunca el globo sobre una ciudad o en cualquier otro lugar en donde la antena pueda entrar en contacto con un tendido eléctrico de alta tensión. No lo haga volar nunca debajo de las nubes, ni lo deje flotando sin prestarle atención.

En el laboratorio de Jefimenko se han construido diversos motores de efecto

corona. Este investigador ha llegado a la conclusión de que sus características pueden mejorarse ampliamente dando una forma adecuada a los electrodos en los que se produce el efecto corona. La superficie de trabajo de los rotores ha de fabricarse de un plástico más bien delgado, tal como el plexiglás o el mylar. Además como he indicado, la superficie interior del cilindro debe recubrirse con una hoja conductora para mejorar el efecto corona. Un cilindro eficiente puede conseguirse, sin grandes gastos, cortándolo de tuberías de plástico. Los rotores de efecto corona pueden fabricarse también en forma de disco.

Uno de los modelos consiste en una serie de discos montados sobre un eje común. Electrodos de doble filo colocados radialmente entre discos adyacentes funcionan de manera muy similar a los peines de Poggendorff. Este diseño no necesita de láminas que forren el cilindro interior o exteriormente ya que existe un gradiente de potencial entre electrodos situados a lados opuestos de los discos. Incluso es posible construir un motor de efecto corona lineal, diseño que sirve para conseguir un movimiento de translación. Para ello, se coloca una banda de plástico entre conjuntos de electrodos de borde afilado, inclinados para iniciar el movimiento en la dirección deseada.

Jefimenko prevé la posibilidad de una aplicación al menos limitada de las máquinas movidas por efecto corona, a pesar del problema de manejar potenciales del orden del millón de voltios sin materiales aislantes eficaces. En *The Physics Teacher* (marzo de 1971), él y David K. Walker escribían: "Estos motores pueden ser muy útiles para ser alimentados directamente por líneas de transmisión de corriente continua de alta tensión, como, por ejemplo, el enlace Pacífico Noroeste-Pacífico Suroeste, de 8 kV, que se está construyendo entre la cuenca del río Columbia y California. Se puede concebir el que tales motores pudiesen sustituir a las complejas instalaciones que ahora se necesitan para convertir corriente continua de alta tensión en corriente alterna de baja tensión. Todo lo que se requeriría, si se empleasen motores de efecto corona, sería accionar generadores locales de corriente alterna de baja tensión mediante motores de efecto corona alimentados directamente desde la línea de corriente continua de alta tensión."

Como señala Jefimenko, un factor que limita el empleo de los motores de efecto corona es que requieren un potencial mínimo de 2000 voltios. Esta limitación la elude un nuevo motor electrostático inventado en 1961 por un físico ruso, A. N. Gubkin. El motor está basado en un electreto fabricado en 1922 por Mototaro Eguchi, profesor de Física de la Escuela Naval Superior de Tokio.

Un electreto es una lámina o plancha de material dieléctrico ceroso que, por estar polarizado, es soporte de un campo eléctrico, más o menos como un imán permanente es soporte de un campo magnético. Una fórmula para fabricar un buen electreto es 45 por ciento de cera de carnauba, 45 por ciento de resina blanca transparente y 10 por ciento de cera blanca de abejas. Puede experimentarse con diversas ceras y resinas.

Los ingredientes se funden y se dejan enfriar, hasta solidificarse, en un campo eléctrico de corriente continua de varios miles de voltios. La polarización de la cera permanece y, por lo tanto, el campo eléctrico creado por ella, aun cuando la fuente externa de potencial haya desaparecido. (En la sección *The Amateur Scientist* del número de julio de 1968 de SCIENTIFIC AMERICAN se explica detalladamente la forma de construir electretos.) Los electretos reaccionan ante las cargas vecinas exactamente como si fueran un electrodo cargado, esto es, son atraídos o repelidos físicamente según la polaridad del electrodo vecino.

Gubkin controló este efecto para fabricar un motor. El rotor consistía en un par de electretos, en forma de sectores sostenidos en los extremos opuestos de un eje. El centro del eje estaba sostenido transversalmente por otro eje. Cuando el rotor giraba, los electretos barrían el campo existente entre pares adyacentes de placas metálicas cargadas, que tenían también forma de sectores.

Las placas se electrificaban mediante una fuente de potencia externa por medio de un interruptor inversor de polaridad, conocido como conmutador. El conmutador aplicaba a los electrodos una carga de polaridad opuesta a la carga del electreto atraído. A medida que el electreto se movía entre las placas, el conmutador conmutaba las placas a fin de hacer coincidir su polaridad con la del electreto. Los impulsos alternativos comunicaban al rotor un momento, exactamente como ocurría en el motor de Franklin.

El motor de Gubkin era deficiente en dos aspectos importantes. Las distancias entre los electrodos y los electretos eran grandes sin necesidad, de tal forma que las fuerzas de atracción y repulsión eran injustificadamente débiles. Además, durante el paso del electreto entre los electrodos sus superficies no estaban

apantalladas. Los electretos sin apantallamiento atraen del aire iones que los neutralizan, perdiendo así su carga al cabo de horas o de días.

Ambas deficiencias inherentes al motor de Gubkin han sido corregidas en el laboratorio de Jefimenko utilizando las ventajas de lo que se denomina efecto de ranura. En lugar de colocar el electreto alternativamente entre pares de placas metálicas, Jefimenko utiliza pares opuestos de placas adyacentes. Las placas adyacentes están separadas por una ranura estrecha. Cuando las placas adyacentes tienen cargas de polaridad opuesta, el electreto se ve sometido a una fuerza dispuesta en su propio plano y perpendicular a la ranura. La intensidad de esta fuerza es máxima ya que el electreto está próximo a los electrodos. Al mismo tiempo, los electrodos funcionan como pantallas e impiden la neutralización del electreto ocasionada por iones libres.

Los motores basados en el efecto de ranura pueden diseñarse de varias formas. Uno de ellos consiste en un electreto en forma de lámina fina de mylar sostenida por un disco plano de madera de balsa de 100 milímetros de diámetro y tres milímetros de espesor. (A la lámina de mylar se le imparte una carga de larga duración introduciéndola en un campo de unos cuantos miles de voltios producido por un generador electrostático, una vez que el motor ha sido montado.) Este rotor se empareda entre cuatro sectores semicirculares conectadas en cruz *(véase la ilustración superior de la página 112)*.

El electreto se monta en un eje de plástico de cuatro mílimetros de diámetro que gira sobre cojinetes de rubí. Las superficies conductoras del conmutador están formadas por tinta china seca. Las escobillas son cintas de hoja de aluminio para envolver alimentos de un milímetro de espesor. El motor funciona con una potencia de unos cuantos microvatios.

Jefimenko ha hecho demostraciones con un motor parecido que estaba proyectado para girar a una velocidad de unas 60 revoluciones por minuto y desarrollaba una millonésima de caballo, mediante una antena de 7 metros de longitud que llevaba en su extremo superior una pequeña sonda de polonio. (Al emitir cargas positivas, las sondas de este tipo aprovechan el campo terrestre de forma algo más eficiente que las puntas de aguja.) El funcionamiento del motor alcanza fácilmente las especificaciones de proyecto. El atractivo de estos motores reside en el hecho de que, aunque no pueden ejecutar grandes cosas, pueden funcionar eternamente.

Taller y laboratorio

Cómo crear y observar una docena de arcos iris en una sola gota de agua

Jearl Walker

El arco iris, imponente y delicado al mismo tiempo, apareció en el cielo mientras me balanceaba con mi abuela en la mecedora de su porche. Aledo, Texas, es un pueblecito donde no hay mucho que hacer, salvo cosas parecidas a balancearse en el porche de la casa de mi abuela. A medida que el arco de color tomaba forma, ella se volvió a su nieto, el físico, y, con mirada socarrona, me preguntó por qué los colores del arco iris aparecen solamente en ese arco. ¿Por qué no se llena de colores todo el cielo?

Yo le di la explicación corriente, comparando la separación de colores en el arco iris con la dispersión de la luz blanca por un prisma. Se necesita una distribución geométrica especial de la dispersión para que cada uno de los colores alcance nuestros ojos, le expliqué. De aquí que los colores estén confinados a un arco único, un conjunto fijo de direcciones.

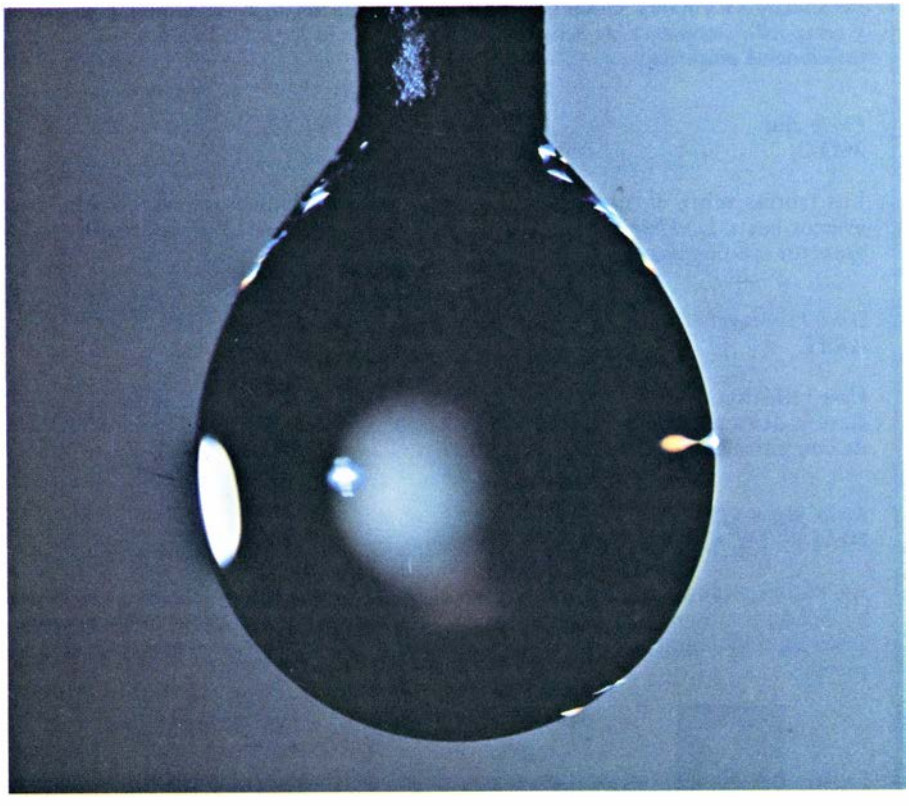
Satisfecho de mi explicación y sintiéndome bastante listo, me volví de nuevo hacia el cielo en el momento en que aparecía el segundo arco iris, algo más alto que el primero. Me bastó con volver a mirar a mi abuela para saber que tendría dificultades. Casi al unísono con nuestro balanceo, ella lanzaba pregunta tras pregunta. ¿Por qué el arco más alto es también el más ancho? ¿Por qué en el segundo arco está invertida la sucesión de colores respecto al primero? ¿Por qué el espacio entre los dos arcos está más oscuro que el cielo circundante? ¿Qué son esos arcos débiles y delgados que están debajo del primer arco iris y encima del segundo? Y, una vez más, si puede haber dos arcos, ¿por qué no más? ¿Por qué no está todo el cielo cubierto de arcos iris?

Cuando mi abuela empieza a preguntarme cómo está hecho el mundo, parece que mi base científica no logra dar alcance a su intuición. La pregunta de por qué el cielo no está cubierto de arcos iris es un buen ejemplo. En efecto, el cielo debería estar lleno de arcos iris, pero las observaciones de más de dos son raras. El arco iris primario, el que se ve más frecuentemente, está formado por rayos de luz que se han reflejado una vez en el interior de gotas de lluvia y han sido desviados hacia el observador. El arco iris secundario, que se ve algunas veces, requiere dos reflexiones internas de los rayos. Las reflexiones internas adicionales deberían dar lugar a arcos de orden superior, pero, al parecer, son demasiado débiles para que se puedan ver fácilmente sobre el resplandor del fondo. Están allí en el cielo, exhibiendo los mismos delicados colores del arco iris ordinario, pero no suelen verse.

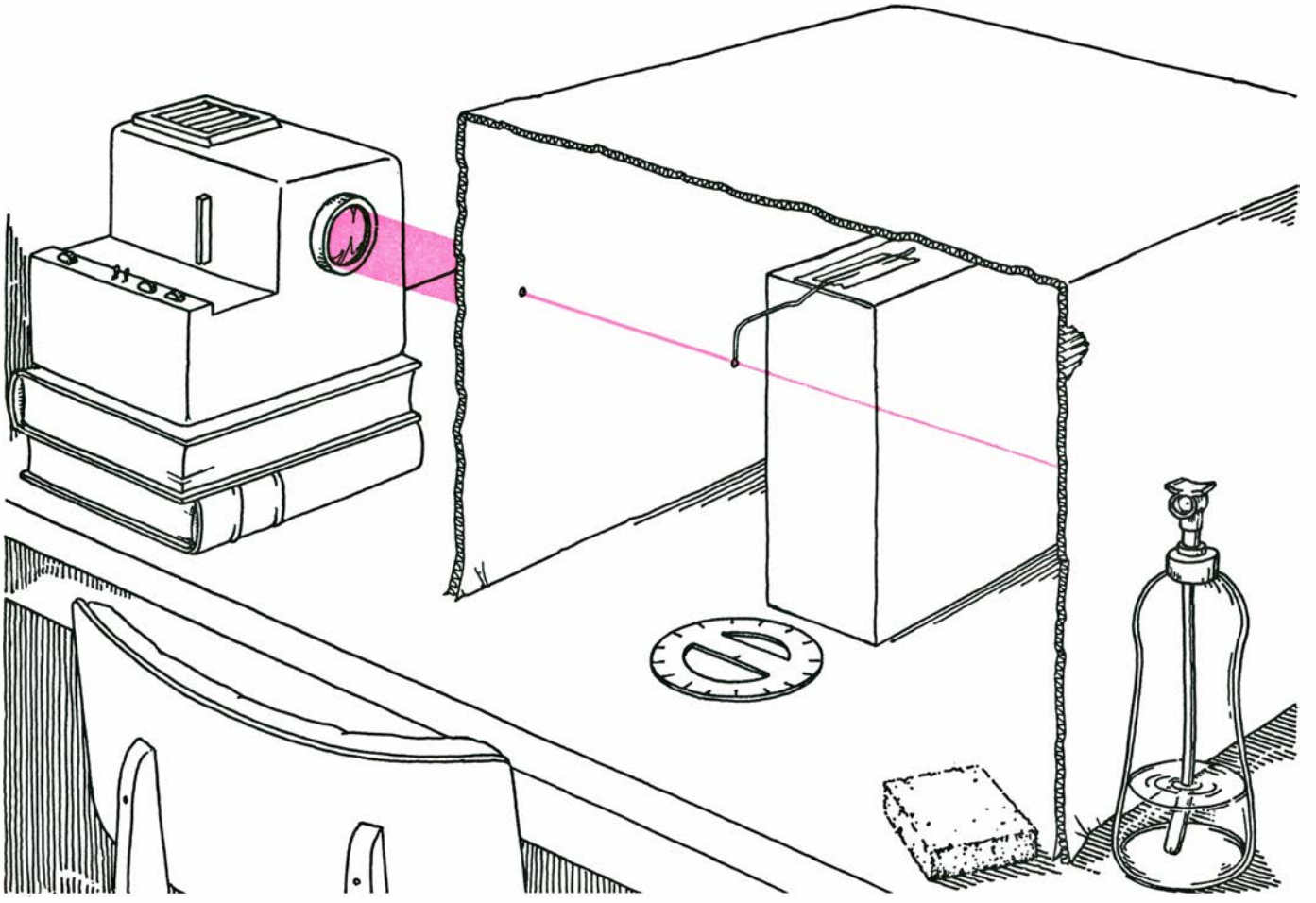
H. Moysés Nussenzveig, de la Universidad de São Paulo, explicó la teoría del arco iris en el número de junio de *Investigación y Ciencia.* Dio cuenta de los intentos hechos desde el tiempo de Newton para explicar el aspecto del arco iris, culminando en recientes teorías matemáticas. Aquí me ocuparé principalmente de la observación de los arcos iris y, en particular, de un experimento mediante el cual se pueden ver muchos de los arcos de orden superior. Con cuidado, todos los arcos hasta el decimotercero deben ser observables. No aparecen en el cielo, sino en una simple gota de agua.

Muy pocas personas han visto arcos iris de orden superior. El investigador francés Felix Billet fue uno de ellos; en 1868 informó de haber observado 19 arcos en un delgado chorro de agua. En lugar de un chorro, nosotros emplearemos una gota suspendida de un fino alambre. El experimento es suficientemente sencillo para que se pueda realizar en la cocina y, sin embargo, permite que uno ingrese en ese pequeño club de personas que han visto arcos iris de orden superior.

Con un pulverizador o una regadera de chorro fino, pulverícese suavemente agua sobre el extremo de un trozo de alambre colocado verticalmente con su extremo libre hacia abajo. Continúese pulverizando hasta que se forme una gota y quede suspendida del extremo del alambre. Para obtener tal gota puede hacer falta práctica y paciencia. Puede



Rayo anaranjado del arco iris de primer orden



Aparato para observar arcos iris en una gota de agua

ser útil recubrir el alambre con cera negra, que ayuda a que el agua tome forma esférica y reduce también el resplandor al iluminar después la gota.

Una vez se ha formado una gota, cúbrase el aparato con una caja grande de la que se haya quitado uno de los lados. Hágase un agujerito en una pared de la caja adyacente al lado abierto y a la altura de la gota. La gota se ilumina a través del orificio y se observa por el lado abierto de la caja. La fuente de iluminación puede ser un proyector de diapositivas o de cine, que se debe colocar de manera tal que el haz de luz que penetra en la caja a través de orificio incida horizontalmente sobre la gota y la atraviese por el centro. Lo ideal es que sólo la gota se ilumine y no el alambre.

La principal razón por la que los arcos iris de orden superior no son visibles en el cielo es el resplandor de la luz solar transmitida directamente o reflejada por las gotas de lluvia. También en nuestro experimento tiende el resplandor a enmascarar los arcos iris, pero en la cocina se le controla más fácilmente que en la atmósfera. Solamente la luz que cae sobre una parte de la gota contribuye a un arco iris dado, y los puntos de fuerte reflejo se deben frecuentemente a luz que ha incidido en otra parte. Es, pues, posible eliminar o al menos reducir el resplandor interceptando una parte del haz incidente. Esto se realiza de forma muy sencilla ajustando una tarjeta de visita al orificio de modo que lo tape en parte.

Céntrese bajo la gota suspendida un transportador de círculo completo, con el cero hacia el lado de la gota opuesto al haz incidente. Con el transportador así alineado se puede medir el ángulo total de desviación de los rayos luminosos por la gota. Los rayos que pasan directamente emergen a cero grados; los reflejados de nuevo hacia la fuente de luz emergen a 180 grados. El arco iris de primer orden se puede hallar entre 137,6 grados (rojo) y 139,4 grados (azul), apareciendo los colores en la vecindad del borde derecho de la gota. El arco de segundo orden aparece hacia 129 grados al lado izquierdo de la gota. Cerca del centro se ven manchas luminosas de reflejo por ambos lados.

El arco iris de primer orden está formado por rayos que se han reflejado una sola vez en el interior de la gota, pero sólo algunos de esos rayos contribuyen a él; el resto emerge a ángulos inadecuados. Para simplificar las cosas, supongamos que sólo está iluminada una mitad de la gota de modo que los rayos incidentes se distribuyen uniformemente desde el centro a un borde, donde tocan la gota tangencialmente. Todos esos rayos son refractados cuando penetran en la gota; después son reflejados por la superficie interior y, finalmente, son refractados de nuevo al salir de la gota. La luz dispersada se reparte según un amplio intervalo de ángulos, viniendo determinada la desviación de un rayo dado por el punto donde incidió inicialmente sobre la superficie de la gota. Los rayos que inciden pasando por el mismo centro atraviesan la gota, se reflejan y son devueltos según la dirección de incidencia, sufriendo una desviación total de 180 grados. Los rayos que inciden más lejos del centro de la gota presentan menores ángulos de desviación, pero sólo hasta cierto punto. A medida que el rayo incidente se va acercando al borde de la gota, se alcanza una desviación mínima. El arco iris es simplemente el reforzamiento del brillo de la luz dispersada para el ángulo en que emergen mayor número de rayos.

El índice de refracción del agua, que determina la cuantía en que los rayos son desviados al penetrar en la gota y al abandonarla, es distinto para cada color, o longitud de onda, de la luz. (La luz azul es refractada más fuertemente que la roja.) Como resultado, cada color tiene un ángulo distinto de mínima desviación para el cual la luz dispersada presenta intensidad máxima. El arco iris subsistiría aun cuando el agua no dispersara la luz blanca en sus colores componentes, pero sería solamente una brillante banda blanca; la dispersión crea una serie de arcos monocromáticos, cada uno a un ángulo ligeramente diferente.

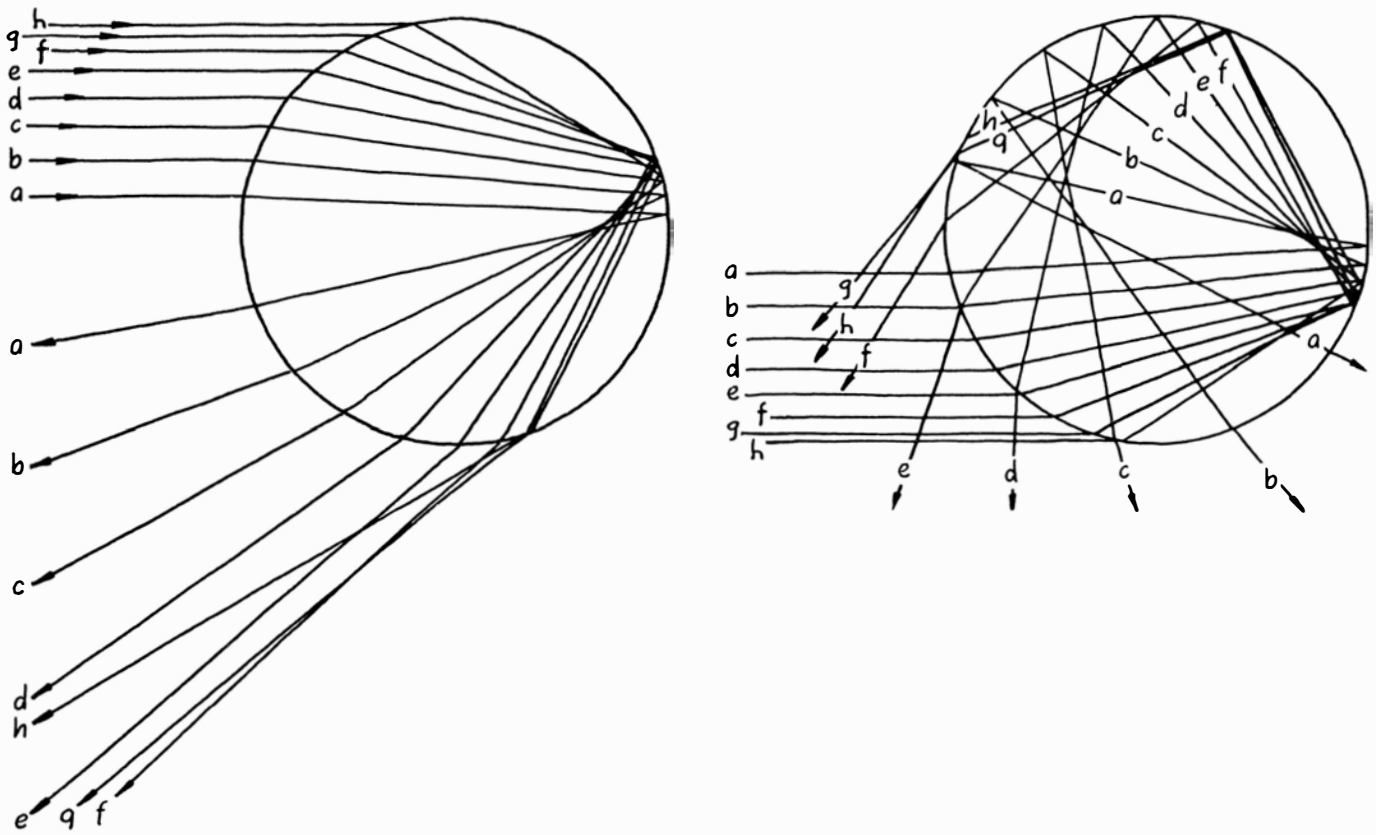
Incluso para el arco iris de primer orden formado en una gota de agua única, la mancha de luz blanca próxima a los colores del arco es comparativamente brillante. Esta mancha está formada por rayos reflejados por la superficie exterior de la gota. Si uno se encuentra a una distancia de la gota superior a un metro, como sin duda ocurre con las gotas de lluvia que forman un arco iris natural, la mancha reflejada y el arco iris serían indiscernibles, y el brillo efectivo de los colores del arco iris quedaría reducido. Los arcos iris naturales de orden superior suelen perderse por completo en el reflejo.

En la cocina, uno puede acercarse lo suficiente a la gota para distinguir los haces independientes de luz reflejada y de arco iris; además, se puede interceptar parte del reflejo. Muévase lentamente el borde vertical de una tarjeta cortando el haz incidente. Si la tarjeta se coloca por la parte del haz opuesta al observador, pronto bloquea los rayos incidentes que contribuyen al arco iris. Si se comienza desde el lado próximo, cuando la sombra del borde ha recorrido aproximadamente la cuarta parte del diámetro de la gota, intercepta los rayos que producen el reflejo. El bloqueo selectivo es más fácil con una gota grande, de unos dos milímetros de diámetro. A medida que la gota se evapora y se hace más pequeña, la colocación de la tarjeta resulta más difícil. La separación de los colores es también más clara con una gota grande, y se atenúa hasta el blanco a medida que la gota se evapora. Los arcos iris naturales con colores muy debilitados se observan cuando son gotas muy pequeñas las que dispersan la luz.

Los rayos que se reflejan dos veces en el interior de la gota, contribuyendo al arco iris de segundo orden, presentan también el máximo brillo para el ángulo de mínima desviación; una vez más, este ángulo es distinto para cada color. Si el arco iris secundario se observa desde el mismo lado de la gota que el primario, el azul cae a 126,5 grados y el rojo a 129,6. Como mi abuela indicó, la sucesión de colores es opuesta a la del arco iris primario, y el de segundo orden es más ancho. La anchura angular es mayor porque los rayos que dan lugar al arco iris de segundo orden penetran en la gota más próximos al borde y sufren una dispersión mayor.

Entre los arcos iris de primero y segundo orden, la gota dispersa relativamente poca luz. Los rayos que se han reflejado una vez dentro de la gota emergen todos según ángulos iguales o mayores que el ángulo del arco iris primario. Los rayos reflejados internamente dos veces emergen según ángulos iguales o menores que el del arco iris de segundo orden. La región angular entre ambos es, por tanto, relativamente oscura. La única luz que emerge en esa región es la que ha sido reflejada más de dos veces y, en consecuencia, es relativamente tenue. Este área oscura entre los dos primeros arcos se llama la "banda oscura de Alejandro", en honor del filósofo griego Alejandro de Afrodisias.

Todos los arcos iris de orden superior se forman mediante el mismo mecanismo que los dos primeros, pero tras reflexiones internas adicionales. Muchos de ellos son débiles y están enmascarados por el reflejo, pero se pueden encontrar si uno sabe dónde mirar. Examinando la gota a los ángulos calculados para los arcos iris de orden superior, yo pude observarlos todos hasta el de decimotercer orden. En varios casos hube de interceptar con una tarjeta los rayos inci-



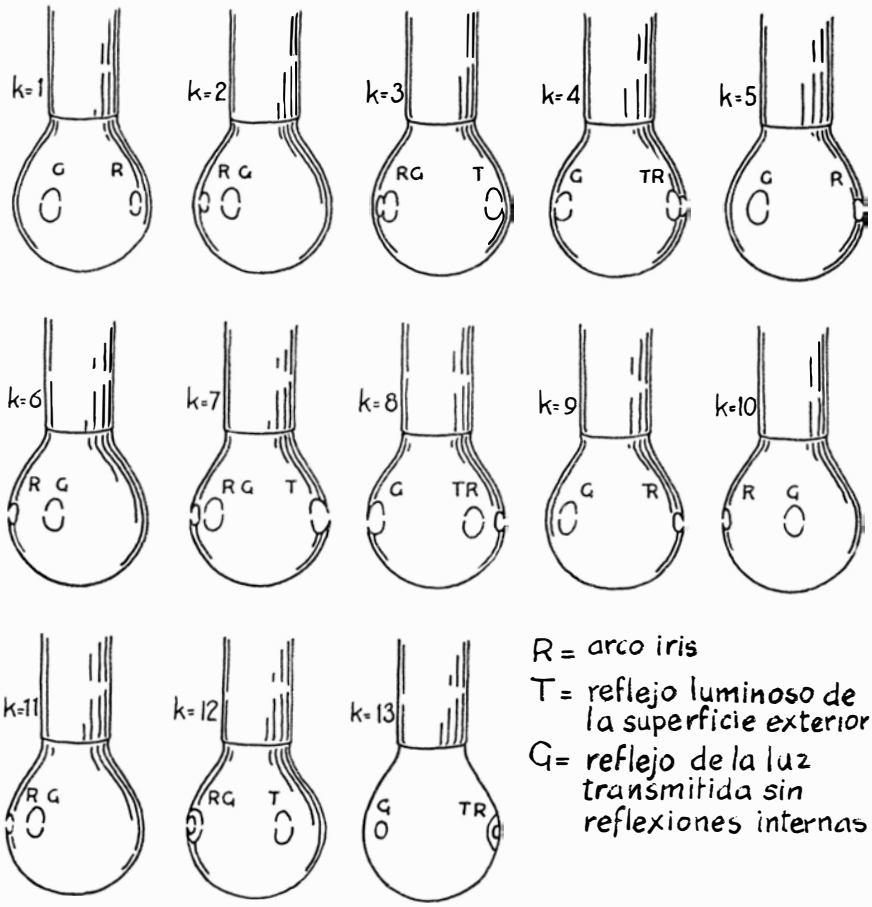
Caminos de los rayos en el arco iris primario (**izquierda**) *y secundario* (**derecha**)

dentes que contribuían al reflejo. Los arcos más difíciles de ver son los que se encuentran cerca del eje del haz incidente. Si uno tiene que mirar hacia la fuente de luz, como ocurre con los arcos cuarto, octavo y duodécimo, entonces no solamente hay que luchar con el reflejo producido por la superficie de la gota, sino también con la luz transmitida a través de ella sin reflexiones internas. Ambas son blancas y relativamente brillantes. Cuando se mira casi directamente según el haz, como en el caso del arco iris de décimo orden, es difícil evitar tapar el haz incidente con la cabeza.

El arco iris de undécimo orden es sorprendentemente acusado si se intercepta parte del haz incidente para eliminar el reflejo. Los arcos duodécimo y decimotercero requieren considerable paciencia para bloquear los suficientes rayos del reflejo, pero no demasiados del arco. Si Billet vio el arco iris de orden 19 en su aparato, o su paciencia o su vista eran mejores que las mías.

En la gota suspendida, puede aparecer luz coloreada mediante otro fenómeno además del arco iris. Una pequeña parte de la luz incidente es casi tangente a la gota y entra en ella casi paralelamente a la superficie. Para esos rayos, como para todos los otros, la luz azul se refracta ligeramente más que la roja. Si se observan los correspondientes rayos emergentes según el ángulo apropiado, sólo se verá la luz azul; la gota tendrá un borde azul. El ángulo correcto es aquel que resulta ligeramente grande para que sea alcanzado por los rayos rojos, pero que se halla dentro del intervalo de la luz azul, más fuertemente refractada. Los bordes azules son demasiado débiles para poder verse en la naturaleza porque es muy poca la luz incidente que entra tangencialmente en las gotas. Cada uno de los arcos iris tiene su propio ángulo de borde azul, pero, más allá de los dos primeros, los bordes son difíciles de encontrar. El borde azul de primer orden aparece al lado derecho de la gota a un ángulo de desviación de 165 grados.

Hay algunos ángulos cercanos a los correspondientes a los arcos iris en que aparecen manchas blancas que no son debidas a reflejo. Son rayos reflejados internamente que emergen según ángulos distintos de los de mínima desviación. Son blancas porque se componen de iguales intensidades aproximadamente de los distintos colores. Dos de tales manchas pueden verse sobre la gota desde un ángulo de 145 grados. Ambas resultan de luz reflejada una sola vez dentro de la gota, pero con diferentes puntos de incidencia, uno a cada lado del



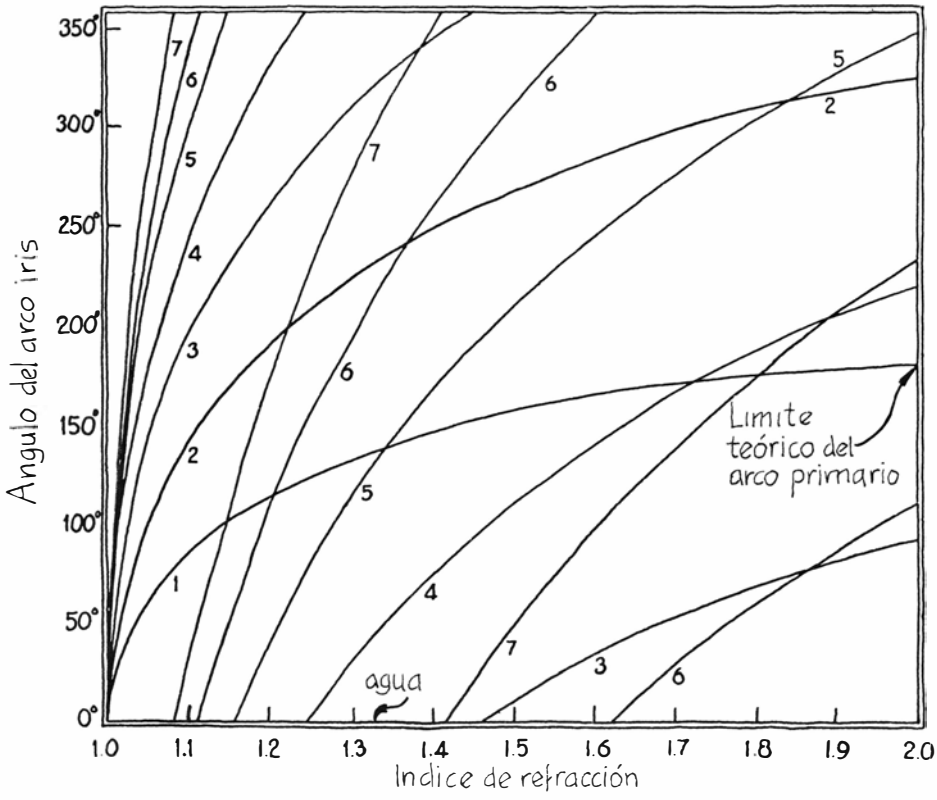
Aspecto de los trece primeros arcos iris

Orden del arco iris	Anchura angular	Rojo	Azul	Lado de la gota
1	1.72°	137.63°	139.35°	derecha
2	3.11	129.63	126.52	izquierda
3	4.37	42.48	38.11	izquierda
4	5.58	42.76	48.34	derecha
5	6.78	127.08	133.86	derecha
6	7.96	149.10	141.14	izquierda
7	9.14	65.59	56.45	izquierda
8	10.31	17.71	28.02	derecha
9	11.49	100.86	112.35	derecha
10	12.65	176.08	163.43	izquierda
11	13.82	93.11	79.29	izquierda
12	14.98	10.19	4.79	medio
13	16.15	72.68	88.83	derecha
14	17.31	155.51	172.82	derecha
15	18.48	121.69	103.21	izquierda
16	19.64	38.91	19.27	izquierda
17	20.81	43.84	64.65	derecha
18	21.97	126.58	148.55	derecha
19	23.13	150.70	127.57	izquierda
20	24.29	67.98	43.69	izquierda

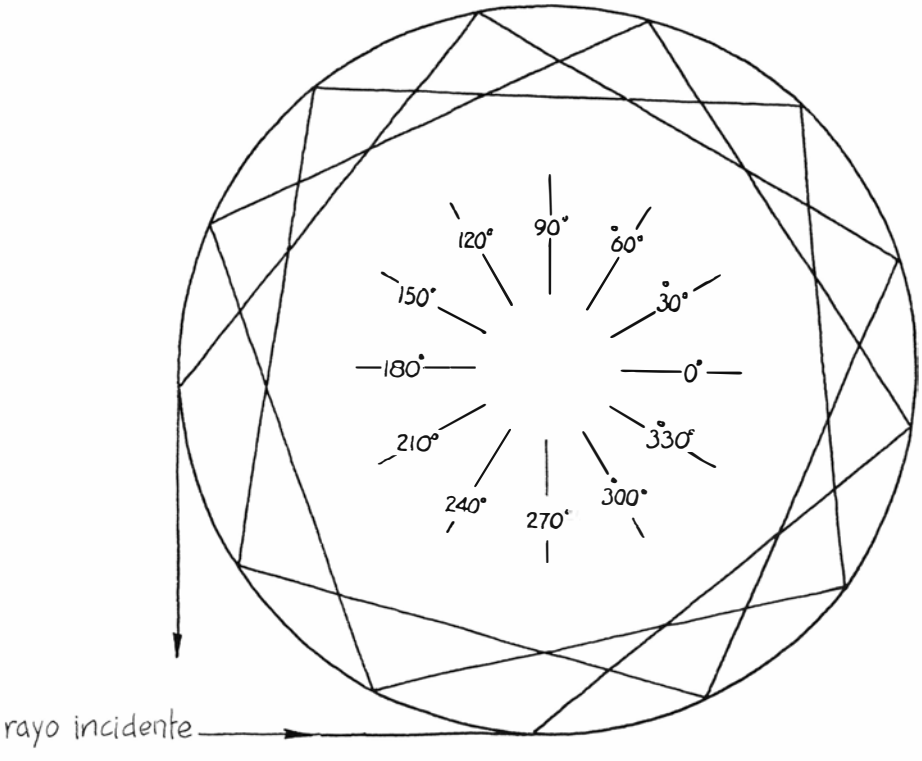
Ángulos calculados de los primeros 20 arcos iris

punto que origina el arco iris primario. Al variar el punto de vista desde un ángulo de 145 grados hacia el ángulo de 138 grados del arco iris, las dos manchas blancas se aproximan entre sí. Para el ángulo del arco iris, se reúnen y adquieren color.

El arco iris natural está polarizado paralelamente a su arco. Se puede determinar el sentido de polarización de los rayos de arco iris que emergen de la gota de agua suspendida observándolos a través de un filtro polarizador, como es un cristal de gafas polarizantes (que están proyectadas para excluir la luz con plano de polarización horizontal). La luz incidente puede considerarse como una mezcla a partes iguales de dos polarizaciones: una en el plano que pasa por la fuente de luz, la gota y el observador, y la otra perpendicular a tal plano. A través de la gota se transmite sin reflexión más luz con la segunda clase de polarización. El arco iris emergente está, por tanto, polarizado perpendicularmente al plano antes definido y paralelamente al arco.



Corrimiento de los arcos iris con el índice de refracción creciente



Formación del arco iris de undécimo orden

La posición angular de los arcos iris depende del índice de refracción del agua, que es aproximadamente 1,33 (para la longitud de onda de 5890 angstroms, que es la de la luz amarilla emitida por una lámpara de vapor de sodio). Yo busqué en la cocina de mi abuela algún otro líquido transparente que tuviese distinto índice de refracción. El más adecuado que encontré fue jarabe de maíz claro. Aplicando cuidadosamente pequeñas cantidades del jarabe al alambre, se puede fabricar una gota. Hay que trabajar de prisa, sin embargo, pues de lo contrario el jarabe se endurece y la gota se deforma. El jarabe fresco de maíz tiene un índice de refracción de 1,47 o 1,48. Como resultado, las posiciones angulares de todos los arcos iris giran en el sentido de las agujas del reloj respecto a sus posiciones en el agua, aunque no en cuantía uniforme. A medida que la gota se evapora a lo largo de los días y el jarabe se hace más concentrado, el índice de refracción aumenta. Los arcos iris giran lentamente en torno a la gota.

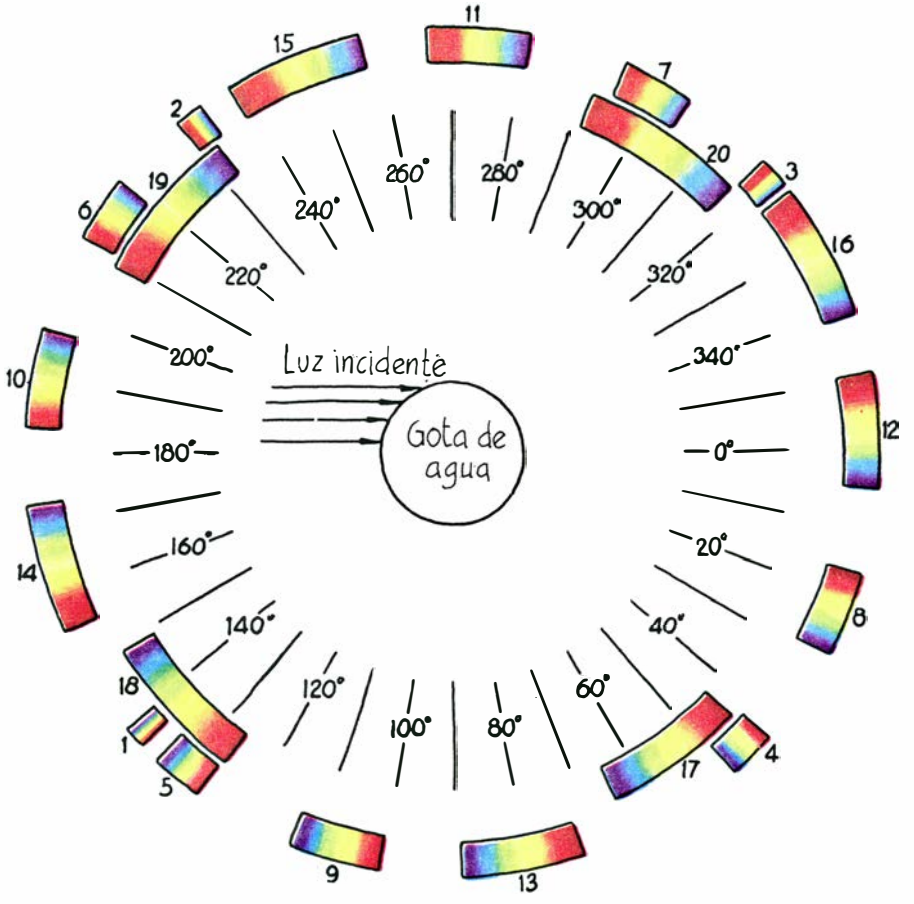
También he observado arcos iris formados en gotas de diiodometano, líquido transparente con el índice de refracción relativamente alto de 1,749 (en luz amarilla). El diiodometano puede obtenerse en establecimientos de productos químicos. Con el diiodometano no pude hallar los arcos iris de primero y cuarto orden porque están formados por rayos reflejados casi directamente hacia atrás en la dirección del haz incidente, y los de tercero y noveno orden quedaban enmascarados por el reflejo. Eran visibles el de segundo orden, los comprendidos entre el quinto y el octavo y el de décimo.

A medida que aumenta el índice de refracción desde el del agua hasta el del jarabe de maíz y el diiodometano, el arco iris de primer orden cambia hacia un ángulo de dispersión de 180 grados. Si el índice de refracción se hiciera exactamente igual a 2,0, el ángulo alcanzaría los 180 grados y el arco iris sería inobservable. Cualquier intento para verlo interceptaría el haz incidente. Aun cuan-

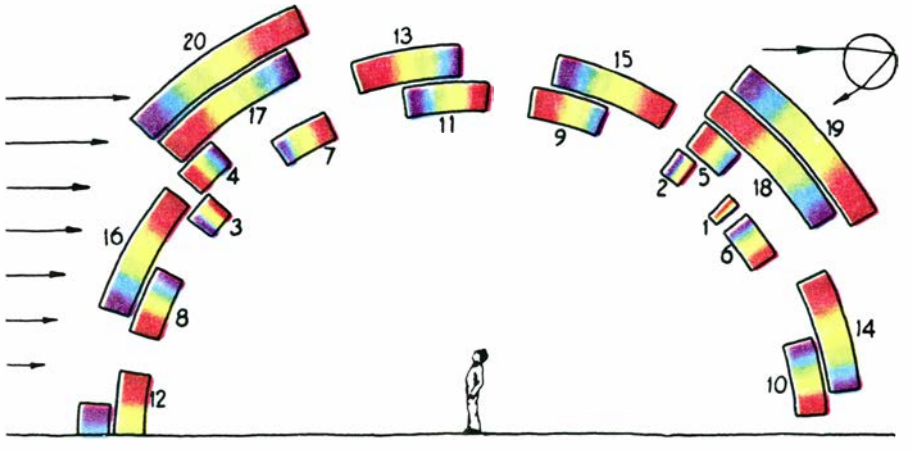
do el engorroso problema del ángulo de visión pudiera resolverse de algún modo, el arco iris de primer orden no aparecería. Con un índice de refracción de 2,0, todos los rayos que penetran en la gota se reflejan en el lado opuesto y son devueltos hacia la fuente luminosa. No hay dispersión y, por consiguiente, tampoco arco iris. Cada uno de los arcos iris de orden superior alcanza un límite análogo para un índice de refracción más elevado.

No todas las preguntas de mi abuela quedan contestadas con este experimento. Por ejemplo, no hemos explicado los débiles arcos que aparecen por debajo y por arriba de los arcos iris naturales, que se llaman arcos supernumerarios.

Tampoco lo ha sido el debilitamiento de los colores del arco iris a medida que la gota se evapora y se hace más pequeña. Pero, en fin, hemos visto los delicados colores de más de una docena de arcos iris dentro de una gota única de agua. ¡Qué fabuloso espectáculo sería que todos esos arcos pudieran contemplarse en el cielo azul!



Rosa de arcos iris rodeando una gota



Conjunto de arcos iris en el cielo

Taller y laboratorio

Un inclinómetro sensible de mercurio que puede actuar como sismómetro

C. L. Stong

Nadie puede asegurar de antemano cuándo va a producirse un terremoto. Sin embargo, investigadores japoneses han observado que, en algunos casos, la superficie de la tierra puede inclinarse muy ligeramente, a lo largo de una línea de falla, un poco antes de que se produzca un seísmo. Los sismólogos han explotado la idea ensayando un instrumento llamado inclinómetro. La parte esencial de un tipo de tales aparatos consiste en dos recipientes cilíndricos que contienen mercurio, algo separados entre sí y que están colocados sobre una base horizontal rígida. Los dos recipientes se hallan interconectados por su base mediante un tubo metálico. Un tubo análogo, pero de plástico, une las partes superiores de los recipientes, en donde hay aire.

Cuando el conjunto se somete a un balanceo, en dirección apropiada, el mercurio pasa de un recipiente a otro. El cambio relativo de nivel del mercurio se mide ininterrumpidamente mediante un circuito eléctrico en el cual las dos superficies libres del metal actúan de placas móviles de un condensador eléctrico diferencial. Una versión rudimentaria del instrumento puede detectar una inclinación de sólo 0,002 segundos de arco, que es aproximadamente el ángulo bajo el cual aparecería un objeto de un milímetro de altura visto desde una distancia de 100 kilómetros.

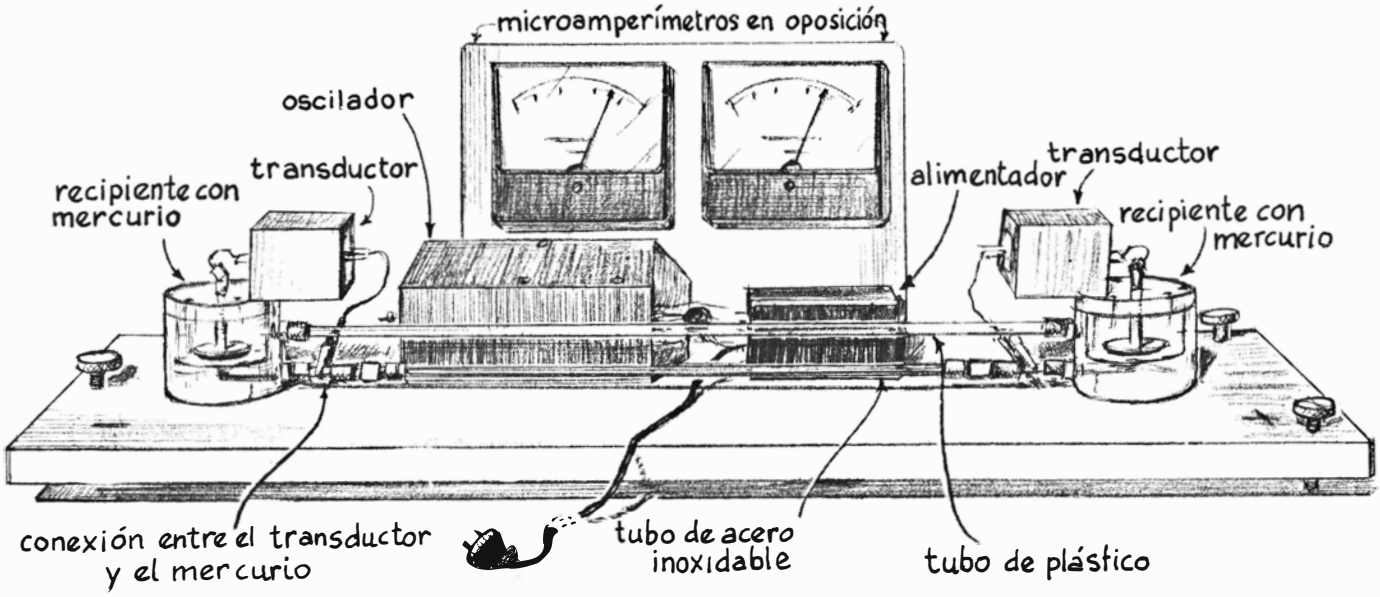
Un inclinómetro de esta clase puede funcionar como un sismómetro barato. El dispositivo es particularmente sensible a las ondas sísmicas que vibran en la dirección de los tubos que unen ambos recipientes. Las aceleraciones experimentadas motivan que el mercurio vaya de un recipiente a otro; dicho líquido actúa de modo análogo al péndulo de un sismómetro corriente, pero el dispositivo es mucho más estable y más fácil de ajustar. Vale la pena reproducir las instrucciones para construir un instrumento de este tipo, con alguno de los efectos sísmicos que puede medir, redactadas por William W. Gile, ingeniero del Laboratorio Sismológico del Instituto de Tecnología de California:

"En la conversación diaria entre la gente del sur de California se habla con mayor frecuencia de la falla de San Andrés que del tiempo, aunque no podamos controlar ninguna de las dos cuestiones. En el lado marino de dicha falla la corteza terrestre se desliza hacia el norte unos cinco centímetros por año. A consecuencia de lo cual, las rocas subyacentes resultan flexadas, se producen desgarros y, finalmente, la falla de San Andrés tiembla.

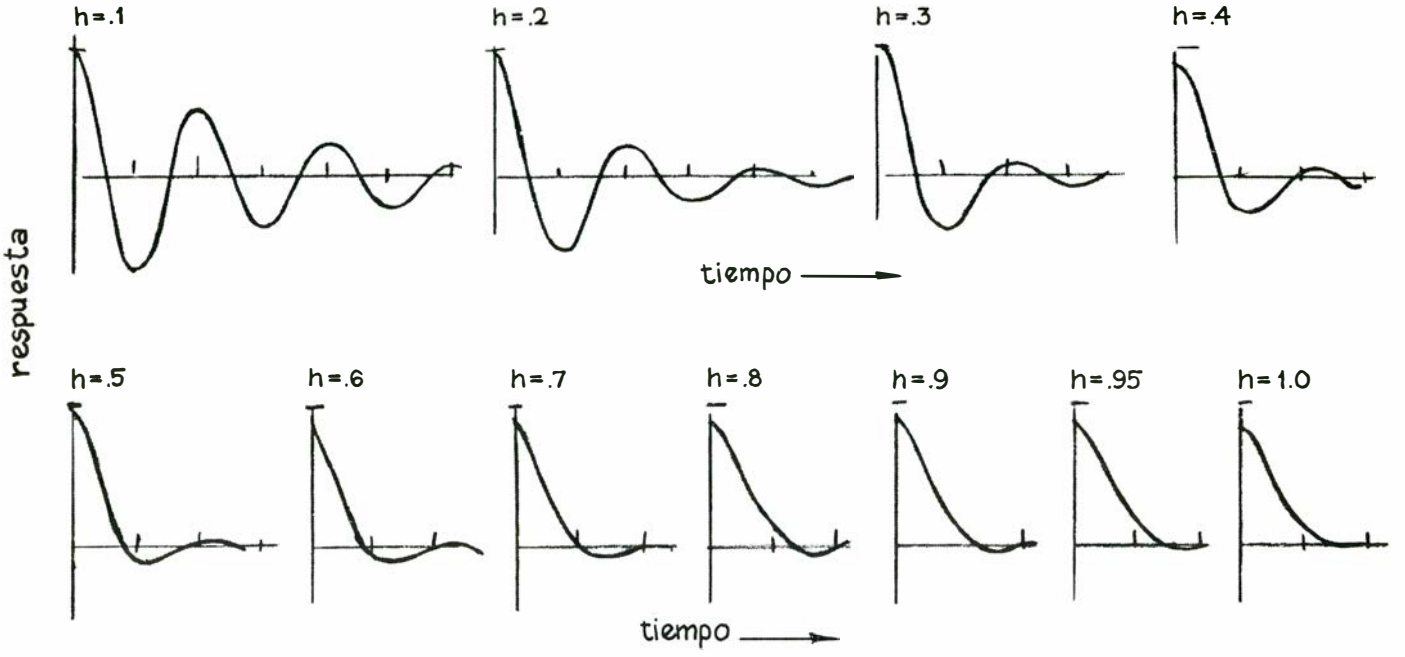
"El reajuste, expresado en términos de centímetros, es impresionante. Así, en 1857 la cerca circular, de unos 6 metros de diámetro, de un corral estaba sobre la falla. El 8 de enero de ese mismo año las tensiones acumuladas a ambos lados de la grieta alcanzaron el valor crítico y se presentaron fracturas de rocas, y cuando los escombros se reposaron la cerca tenía forma de una S. Durante los 116 años siguientes se han ido acumulando las tensiones y, si el movimiento relativo a lo largo de la grieta ha sido de cinco centímetros por año, las placas rocosas habrán experimentado una flexión de cerca de seis metros.

"Por tales razones la predicción de los terremotos se ha convertido en un foco de atención en diferentes ramas de la geofísica y de la sismología. Son varias las técnicas predictoras en las que se tiene depositada la confianza. Pero hay que señalar que aunque no se dispone de un método para predecir los terremotos, las investigaciones actuales no excluyen la posibilidad de lograrlo. Esta esperanza real, aunque débil, mantiene el entusiasmo de los dedicados a trabajar en el campo de la instrumentación sísmica.

"El esfuerzo ha sido premiado en los últimos años con el desarrollo de algunos aparatos notablemente sensibles. Por ejemplo, actualmente, existen medidores de tensiones que de una manera rutinaria aprecian fuerzas equivalentes a las que se desarrollarían si una placa rocosa de la



Inclinosismómetro diseñado por un grupo del Instituto de Tecnología de California



Ejemplos de oscilaciones con diversos valores del factor de amortiguamiento **h**

anchura de los Estados Unidos aumentara en el espesor de un cabello humano. Asimismo existen sensores de temperatura que se emplean en perforaciones profundas que pueden detectar variaciones térmicas, a través de las líneas de falla, que aprecian milésimas de grado centígrado. Finalmente, indicaremos que están disponibles inclinómetros de líneas de base largas que pueden detectar cambios angulares del orden de 10^{-12} radianes, que es aproximadamente el ángulo que corresponde a un segmento de medio milímetro colocado en la luna y visto desde la tierra.

"Algunos de los dispositivos son relativamente baratos y fáciles de ajustar. Un ejemplo lo constituye el inclinómetro de base corta *(véase la ilustración de la página opuesta)*. Hemos empleado versiones del mismo en las islas Hawaii para medir cambios en la inclinación de la corteza terrestre ocasionados por las erupciones del volcán Halemaumau. El instrumento trabaja también como sismómetro sensible. Combinado con un registrador de plumilla adecuado, puede revelar las mareas terrestres: es decir, el movimiento diario de ascenso y descenso de la corteza terrestre provocado por las fuerzas de marea ejercidas por la luna y el sol. Su bajo coste, la facilidad de construcción y su alta estabilidad y buena sensibilidad determinan que sea el instrumento ideal para aficionados y profesionales.

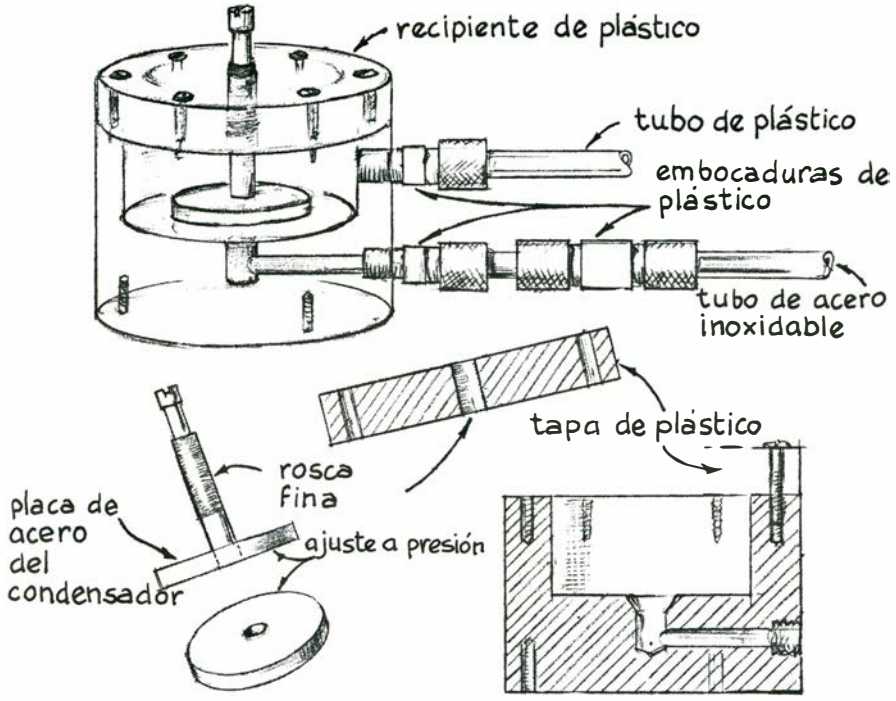
"Los sismómetros convencionales a base de un péndulo dependen de ajustes críticos, según la perturbación sísmica, que determinan el ritmo del péndulo, el número de oscilaciones que realizan antes de pararse y la posición en la que permanecen en reposo. Aunque el mercurio del inclinómetro actúa como un péndulo no necesita de tales molestos ajustes. El período de su oscilación y el amortiguamiento (la rapidez con la cual se para, después de experimentar una perturbación) vienen determinados por las propiedades físicas del mercurio, junto con las dimensiones de los recipientes y de los tubos de conexión. Tales características no cambian de modo apreciable en el transcurso del tiempo. Por ello el instrumento es estable. Una regla normal en la instrumentación sísmica expresa que el período del péndulo –intervalo necesario para completar una oscilación en movimiento de ida y vuelta– debe ser mayor que el de la onda sísmica más larga que haya que registrar. Esta condición es necesaria si se quiere medir el período de las vibraciones sísmicas. En efecto, la masa pendular permanecerá en reposo todavía aunque su soporte vibre, si el período del péndulo es largo respecto al de la vibración. En otras palabras, la masa estacionaria del péndulo sirve de referencia en la medición del movimiento relativo de la corteza terrestre. El principio se aclara mediante un interesante experimento.

"Se toma un cordel de unos 30 cm de longitud, y por uno de sus extremos se ata a un pequeño peso. Por el otro extremo, se sujeta el cordel con la mano, de modo que la parte de la que cuelga el peso sea de 25 cm. Se mueve horizontalmente la mano a un ritmo de cinco oscilaciones por segundo. Se observa que el peso apenas se mueve. Nuestra mano representa la tierra y, el peso, la lenteja del péndulo del sismógrafo; así puede observarse el movimiento relativo terrestre.

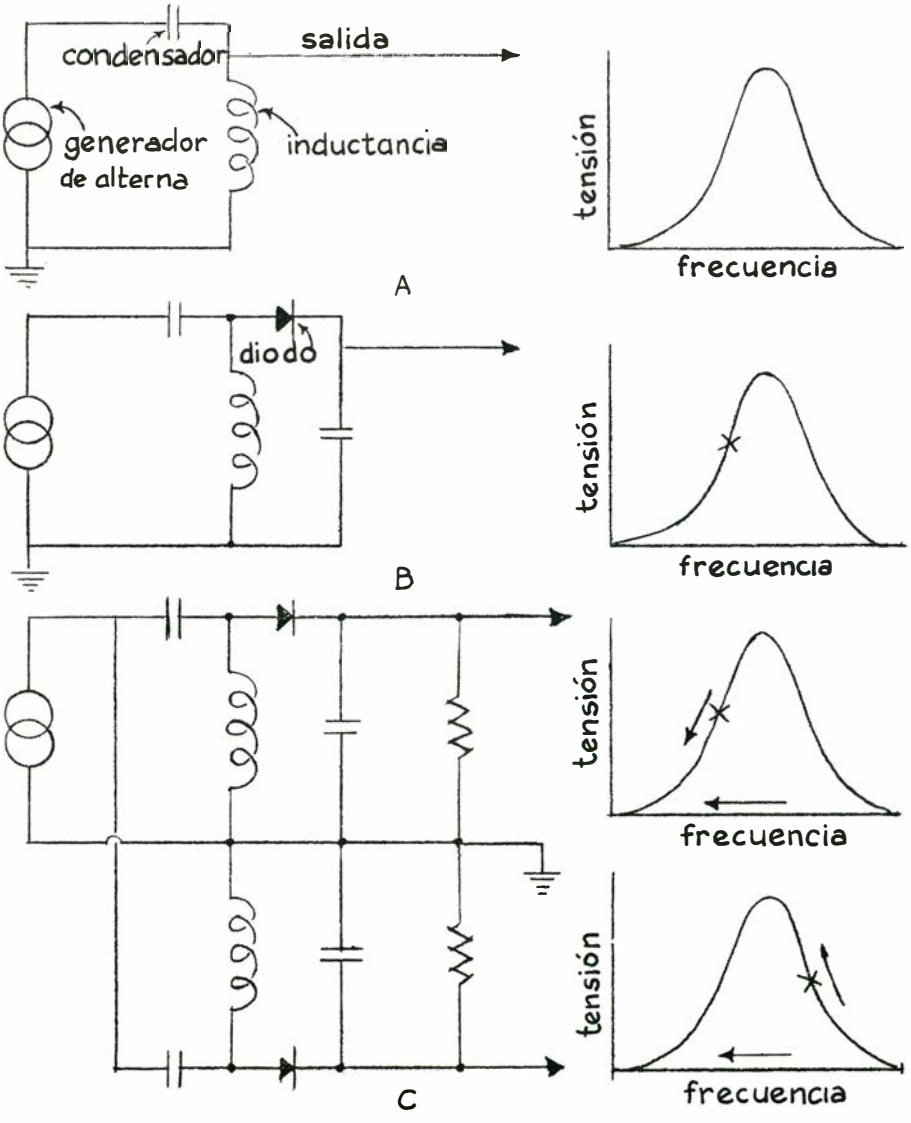
"Repítase la experiencia cambiando el ritmo del movimiento de nuestra mano de modo que sea sólo de una oscilación por segundo. Se observa, en seguida, que el peso oscila con violencia de un lado para otro. La causa reside en que un segundo coincide aproximadamente con la duración del período natural con el que vibra un péndulo de 25 cm, esto es, una oscilación por segundo es la frecuencia propia de la vibración para la cual se presenta resonancia. Si el período de un sismógrafo coincidiera con el de una vibración terrestre se tendría una medida muy exagerada del seísmo correspondiente.

"Párese la mano. El péndulo sigue moviéndose pero con amplitud decreciente. Se dice que está poco amortiguado. El efecto de amortiguamiento resulta de la supresión del movimiento del péndulo por pérdida de energía en el rozamiento. Se dice que un péndulo está críticamente amortiguado cuando se para tras cada vibración. Los buenos sismógrafos que emplean péndulos mecánicos llevan dispositivos ajustables para disipar la energía inadecuada.

"Finalmente, muévase la mano a uno y otro lado lentamente con un ritmo correspondiente a 10 segundos para una oscilación completa. Se observará que el movimiento del peso sigue el movimiento de nuestra mano. Si el ajuste de un péndulo correspondiera a tal situación no apreciaría las sacudidas sísmicas



Detalle de uno de los recipientes de mercurio



Evolución del circuito básico discriminador

de largo período. Para precisar, en el caso de un sismógrafo de desplazamiento, tal como el ilustrado con el experimento, la sensibilidad disminuye con un ritmo de 12 decibelios por octava para vibraciones sísmicas de frecuencia menor que la que corresponde a las vibraciones libres del péndulo. Esto es, cada vez que se duplica el período del seísmo, la amplitud del movimiento del péndulo se reduce a la cuarta parte.

"La tierra muestra un período propio de 53 minutos por ciclo. Es la frecuencia con la que la tierra "suena como una campana" para un gran terremoto. Un péndulo ordinario de este período debería tener una longitud superior a 2400 kilómetros. El período, expresado en segundos, se calcula con aproximación mediante la fórmula $6{,}28\sqrt{l}$; en donde l es la longitud del péndulo expresado en decenas de metro.

"Como ya hemos mencionado, el mercurio de un sismómetro de base corta se comporta como un péndulo. Su período propio está determinado por el diámetro interior de los recipientes y de los tubos de conexión así como por la distancia entre los recipientes. Vale la fórmula siguiente: $T = 2\pi(D_1/D_2)\sqrt{L/2g}$; en donde T representa el período expresado en segundos; D_1 y D_2 son, respectivamente, los diámetros interiores de los recipientes y de los tubos de conexión expresados ambos en la misma unidad, por ejemplo, centímetros; L es la distancia entre centros de los dos recipientes, que se expresará en centímetros, si se toma como valor g de la aceleración de la gravedad 980 cm/s².

"Un instrumento de tamaño adecuado y excelentes características, que es muy apropiado para ser construido por un aficionado, muestra una distancia entre centros de los recipientes de 60 cm con un diámetro interior de cinco centímetros. Los recipientes deben conectarse mediante tubos de acero inoxidable de unos 2'5 mm de diámetro interior. El período de este sismómetro que recomendamos se obtiene aplicando la fórmula que hemos dado. Resulta: $T = 2\pi(5/0{,}25)\sqrt{60/2.980} = 22$ segundos.

"¿Por qué no se usan recipientes más anchos en relación a los tubos de conexión a fin de obtener períodos de una hora o más? En teoría, el período puede aumentarse tanto como se quiera. La práctica indica que el mercurio se mueve menos en los recipientes cuando aumenta la razón de diámetros. La sensibilidad del instrumento para las ondas largas no aumenta con el período.

"Es instructivo conocer el método de cálculo del factor de amortigua-

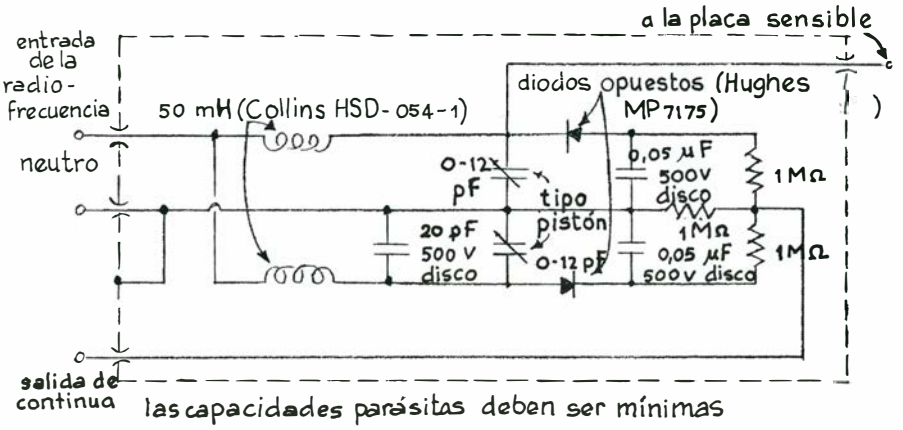
miento del péndulo. Como ya hemos indicado, con el nombre de amortiguamiento se expresa la tendencia de un péndulo a vibrar con amplitud decreciente después de haber sido puesto en movimiento. Dicha tendencia se traduce mediante un factor h que se aproxima a cero en el caso de un péndulo muy poco amortiguado. En el otro caso extremo vale uno cuando el péndulo vuelve a su posición de equilibrio y permanece en ella exactamente, al cabo de medio período.

"En el caso del péndulo de mercurio, el factor de amortiguamiento h se calcula mediante la fórmula $2uT/[\pi d(D_2/2)^2]$, en donde $u=0{,}01554$ (la llamada viscosidad del mercurio expresada en la unidad poise), T es el período del péndulo en segundos, $d=13{,}55$ (la densidad del mercurio en gramos por centímetro cúbico) y D_2 es el diámetro interior de los tubos de conexión expresado en centímetros. El factor de amortiguamiento del sismómetro que hemos recomendado se obtiene sustituyendo los valores adecuados en la fórmula precedente. Resulta $h=2 \times 0{,}01554 \times 22/[3{,}1416 \times 13{,}55 \times (0{,}25/2)^2]=1{,}03$. El péndulo está algo sobreamortiguado, es decir, se para en menos tiempo que el necesario para completar un ciclo de oscilación.

"Las proporciones pueden variarse con objeto de cambiar tanto el período como el factor de amortiguamiento. En la mayoría de instrumentos profesionales el factor de amortiguamiento está comprendido entre 0,7 y 1. Los cálculos indican que se consigue un período de 25 segundos y un factor de amortiguamiento de 0,76 conectando dos recipientes de 5 centímetros, con una distancia entre centros de 1,2 metros, mediante tubos de acero inoxidable de 3,1 milímetros de diámetro interior. Los experimentadores pueden modificar las dimensiones para conseguir otras características.

"Los recipientes cilíndricos pueden ser de plástico transparente. Si el experimentador no dispone de torno, los recipientes pueden fabricarse con una base plana y con tubo de pared gruesa. Los recipientes deben ser cilíndricos, y no rectangulares, para evitar el desarrollo de turbulencia no lineal. Esta no queda eliminada de modo diferencial y se añade al "ruido" de sistema.

"Los dos recipientes se conectan entre sí por medio de tubos de acero inoxidable. Se ha elegido dicho material pues proporciona un contacto eléctrico con el mercurio y así se evita la formación de amalgama en el punto de unión con el circuito eléctrico. El segundo tubo, que está situado por encima de la superficie libre del mercurio, sirve para igualar la presión en los recipientes. Puede ser de plástico.



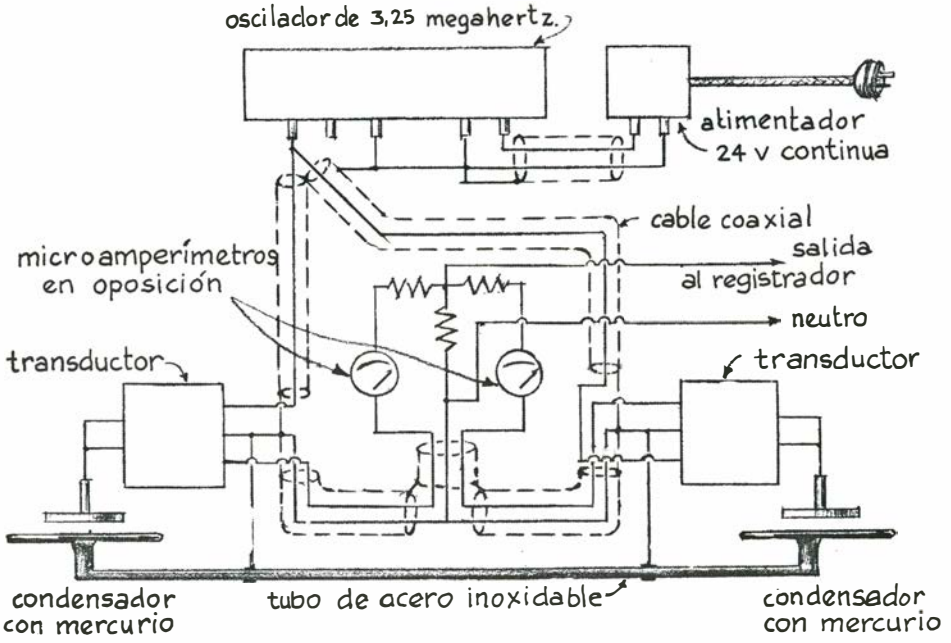
Esquema del circuito del discriminador inverso

"Conviene llenar los recipientes de los aparatos de base larga con nitrógeno para evitar la oxidación en las superficies libres del mercurio. A veces, en tales instrumentos se emplean líneas de base de 30 metros. Los tubos son de plástico de butirato, pues el coeficiente de dilatación de tal material es aproximadamente igual al del mercurio. Los contactos eléctricos con el metal están asegurados por las embocaduras de acero inoxidable que acoplan el tubo de plástico a los recipientes.

"Se mantiene un electrodo fijo en forma de disco pulido de acero inoxidable por encima de la superficie del mercurio en cada recipiente, mediante una varilla roscada que pasa a través del centro de la tapa. Estos electrodos constituyen las placas fijas sensoras del condensador del péndulo de mercurio. Deben formar un ángulo recto con la varilla soporte.

"La varilla actúa como tornillo para ajustar la distancia entre la superficie del electrodo y la del mercurio. El paso de rosca debe ser lo más pequeño posible. Hemos empleado el de 0,3 milímetros. Si no se dispone de útiles apropiados los roscados se encargan en un taller del ramo.

"Si la tapa de plástico tiene un grosor de un centímetro o poco más y se hace un agujero ligeramente más estrecho que la varilla, puede no ser necesario el roscar, pues la varilla roscada dejará una débil huella helicoidal en el plástico. La base para sostener el instrumento debe ir provista de tornillos de nivelación. Puede improvisarse con el perfil de aluminio, en forma de tubo rectangular, frecuentemente empleado en marcos de puertas para oficinas. Fácilmente pueden conse-



Esquema del cableado del inclinosismómetro

guirse trozos de longitud adecuada de dicho material a bajo coste.

"Un transductor electrónico, denominado discriminador inverso, convierte el desplazamiento experimentado por el mercurio en una señal variable de potencial eléctrico. La tensión correspondiente puede actuar sobre un registrador de plumilla. En esencia, el transductor consta de un circuito semejante a los empleados en los aparatos de radio para detectar señales de frecuencia modulada. Tales circuitos reciben el nombre de discriminadores. Suelen incluir un condensador fijo y una bobina que ayuda a detectar las señales llevadas por una frecuencia variable. Nuestro aparato actúa al reves: una corriente eléctrica de frecuencia fija ayuda a detectar señales producidas por el débil movimiento en un condensador diferencial del péndulo de mercurio.

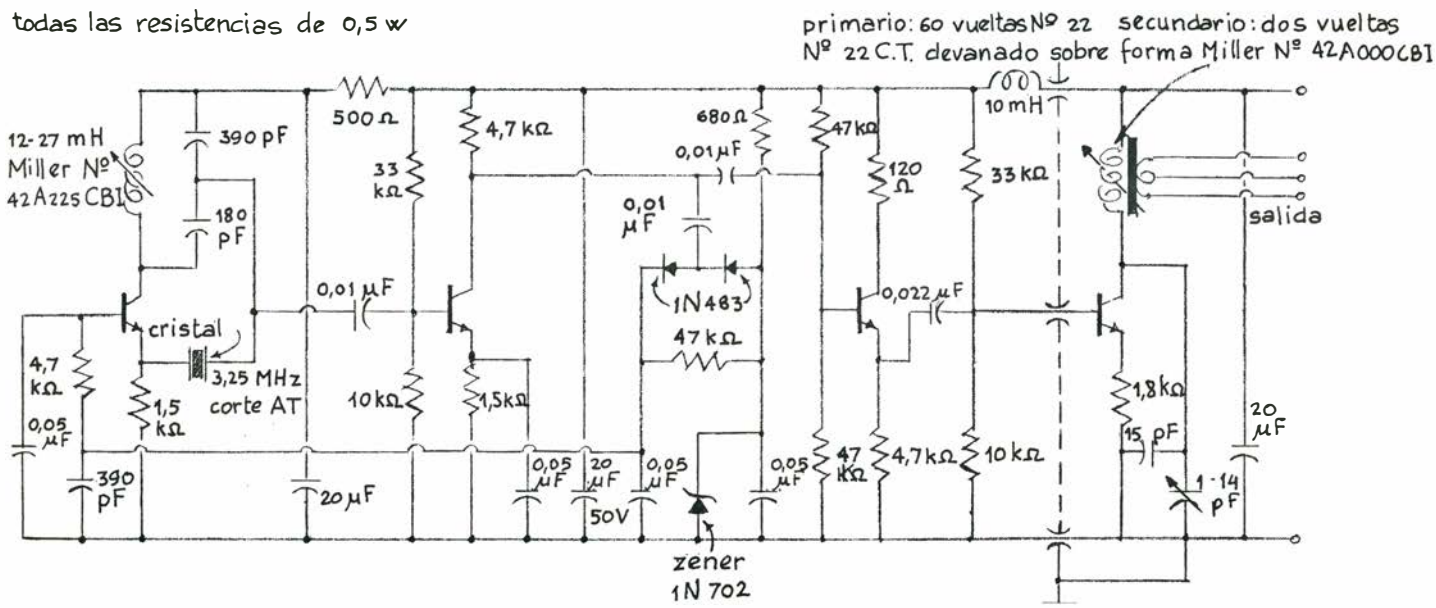
"Los circuitos discriminadores son, fundamentalmente, sistemas resonantes. Son análogos a péndulos, a las cuerdas de los instrumentos musicales y demás mecanismos similares que vibran con la máxima amplitud cuando son excitados por un estímulo de período igual al propio del sistema. El principio básico se aclara con un circuito eléctrico formado por un condensador y una inductancia, que es resonante a una determinada frecuencia. Cuando se depositan cierta cantidad de electrones en una placa del condensador, pasan a través de la inductancia para acumularse en la otra placa, vuelven a la primera placa en la fase siguiente, y así sucesivamente, con un movimiento parecido al del péndulo. Cuando el sistema recibe un impulso, vibra de un modo continuo con un ritmo característico.

"El inductor de tales circuitos generalmente consiste en un pequeño carrete con alambre aislado. Supondremos que el condensador y el inductor están conectados en serie con un generador eléctrico que funciona con una frecuencia más baja que la frecuencia propia del circuito, y que la frecuencia del generador va aumentando gradualmente hasta que supera a la propia del circuito resonante. Supóngase que se dispone de un medio para medir la diferencia de potencial entre los bornes del carrete. Se observará que la tensión en el carrete es mínima cuando la frecuencia impuesta por el generador es más baja que la frecuencia propia del circuito, que la tensión es máxima cuando hay resonancia y que disminuye a medida que la frecuencia del generador supera la frecuencia propia del circuito.

"La tensión alterna en el carrete puede convertirse en continua intercalando un diodo en el circuito; pueden amortiguarse sus oscilaciones conectando en el circuito un segundo condensador que actúa como filtro. El conjunto constituye un detector de rampa. Se ha empleado en los aparatos de radio y televisión de poco precio para detectar las señales en frecuencia modulada. En tales aplicaciones el detector de rampa está sintonizado de modo que la frecuencia media de la emisora esté localizada hacia la mitad de la característica que queda por encima de la resonancia, tal como está indicado por la letra *X* en la gráfica del detector. Cuando la frecuencia impuesta se separa de dicho punto las tensiones de salida del detector de rampa se separan de modo proporcional. La tensión y la linealidad obtenibles a la salida pueden mejorarse conectando, uno tras otro, dos circuitos.

"Nuestro discriminador inverso funciona al revés. Una corriente alterna de frecuencia fija es impuesta a través de un circuito de resonancia variable. La señal procede del movimiento del condensador variable diferencial del péndulo de mercurio. Sintonizamos los transductores al 50 por ciento del pico de salida resonante. Para un potencial de entrada de un voltio entre pico y pico, el pico de salida de cada transductor es de unos 30 voltios. Las salidas de los transductores son detectadas, filtradas y combinadas mediante tres resistencias, con objeto de suministrar una salida final única. En la práctica cada circuito transductor está conectado en paralelo con un condensador de ajuste (trimmer) del tipo de pistón. Con estos trimmer pueden compensarse pequeñas variaciones en las características de los carretes y capacitancias.

"La frecuencia constante es producida por un oscilador gobernado por un cristal. En el circuito de éste puede emplearse un transistor de silicio con una tensión colector-emisor de 45 voltios y una disipación de 0,3 vatios. El colector debería regularse a 0,05 o más amperios, y la pequeña señal, neutro-emisor-razón de transferencia *hfe*, debería ser próxima a dos a una frecuencia de 30 megahertzios. Incluso en los catálogos desechados se encuentran listas con muchos transistores que cumplen o exceden de estas especificaciones. Los experimentadores no habituados a las técnicas de los circuitos resonantes y los osciladores a base de transistores convendrá que



Esquema del circuito del oscilador de cristal de 3,25 megahertzios

busquen la ayuda de un radioaficionado.

"Una vez completo el instrumento conviene instalarlo sobre cimientos firmes en un ambiente de temperatura lo más constante posible. Nuestros sismógrafos e inclinómetros están en túneles que se encuentran a varias decenas de metros bajo tierra, y están equipados con servomecanismos que compensan automáticamente los cambios de temperatura. Sin embargo, un instrumento de características excelentes puede instalarse simplemente en un sótano o semisótano, principalmente si se aísla mediante una caja de paredes gruesas de styrofoam. Hay que usar mercurio destilado. Se necesitan unos 200 gramos para un instrumento de 60 cm de longitud.

"Se eleva unos 30 centímetros uno de los extremos del instrumento para eliminar en lo posible las burbujas de aire del mercurio y del tubo de conexión. Acto seguido se baja rápidamente. Se ajusta la base de modo que quede horizontal mediante un nivel de burbuja. Se reduce al mínimo la capacidad de los trimmer de los transductores. Se establece una unión entre el punto de enlace de las tres resistencias de un megaohmio y el punto neutro.

"Se da paso a la alimentación del oscilador. Mediante el tornillo de ajuste se reduce la distancia entre la superficie del mercurio y la placa censora de uno de los recipientes hasta que el aparato señale medio microamperio. De modo semejante se ajusta el otro recipiente.

"Se ajusta la capacidad de los trimmer hasta que cada aparato marque 3,5 microamperios. Se sustituye la unión indicada por un voltímetro de alta impedancia, el cual deberá señalar cero voltios. Si no ocurre así, se modifica la posición de una de las placas sensoras con el mercurio hasta que el voltímetro señale cero voltios. Con esto el instrumento queda equilibrado.

"Finalmente, se separa hasta el tope una de las placas sensoras. El voltímetro señalará un potencial de 17,36 milivoltios. Si marca más, la sensibilidad del aparato es excesiva. Auméntese la distancia entre las placas y el mercurio en ambos recipientes. Acto seguido, se incrementa la capacidad de los trimmer hasta que el instrumento señale de nuevo 3,5 microamperios. Si la tensión de salida es menor que 17,36 milivoltios se procede al revés puesto que la sensibilidad no es adecuada. Si se desea emplear el aparato exclusivamente como sismómetro, y con ello se pretende la mayor sensibilidad posible, se ajustan los trimmer de modo que tengan la menor capacidad y los condensadores de los recipientes posean la capacidad máxima.

Taller y laboratorio

El agua caliente se congela más aprisa que el agua fría. ¿Cómo es ello posible?

Jearl Walker

A veces se oye decir que el agua caliente se congela antes que el agua fría. La creencia es bastante antigua; las gentes de regiones frías, como Canadá, lavan sus coches o llenan las fuentecillas donde beben los pájaros en su jardín con agua fría, creyendo que con ello retrasarán la congelación. ¿Es cierto esto? La respuesta es afirmativa, aunque el resultado, que va en contra de lo que intuitivamente se diría, carecía de base hasta que Erasmo Mpemba, estudiante de la escuela superior de Tanzania, redescubriera el efecto mientras elaboraba helado (de crema) como parte de un trabajo práctico de física.

El experimento consistía en calentar leche, echarle azúcar, mezclar, enfriar la mezcla hasta temperatura ambiente y después depositarla en el congelador. Cierto día, Mpemba y un compañero suyo colocaron sus respectivas mezclas en el frigorífico al mismo tiempo, pero debido a que los dos tenían prisa, ni Mpemba se preocupó de enfriar su mezcla ni su compañero en calentar la suya. Mpemba se sorprendió cuando vio que su mezcla caliente se había congelado mucho antes que la mezcla tibia.

El efecto del helado ganó en credibilidad y fama cuando Mpemba y D. G. Osborne, del Colegio Universitario de Dar es Salaam, publicaron un trabajo sobre el mismo en "Physics Education". Este trabajo despertó una fecunda polémica, tanto en ésa como en otras publicaciones. Los científicos que escribieron sobre el trabajo mantenían, unos, que el efecto era ya suficientemente conocido y, otros, que la forma de hacer el experimento había sido errónea. El efecto es real, indiscutiblemente, pero la explicación del hecho sigue siendo motivo de controversia.

Una de las primeras explicaciones que se dieron fue que el recipiente más caliente hacía fundir el hielo subyacente, produciéndose así un mejor contacto térmico con la estantería del congelador. Sin embargo, el efecto es el mismo si el recipiente está térmicamente aislado de la estantería del congelador, como en el caso del experimento de Mpemba y Osborne. Además, esta explicación no es válida para los ejemplos citados, como lavar coches y llenar los bebederos de los pájaros, ni tampoco lo es cuando se usan frigoríficos de descongelación automática, en los que no se forma escarcha.

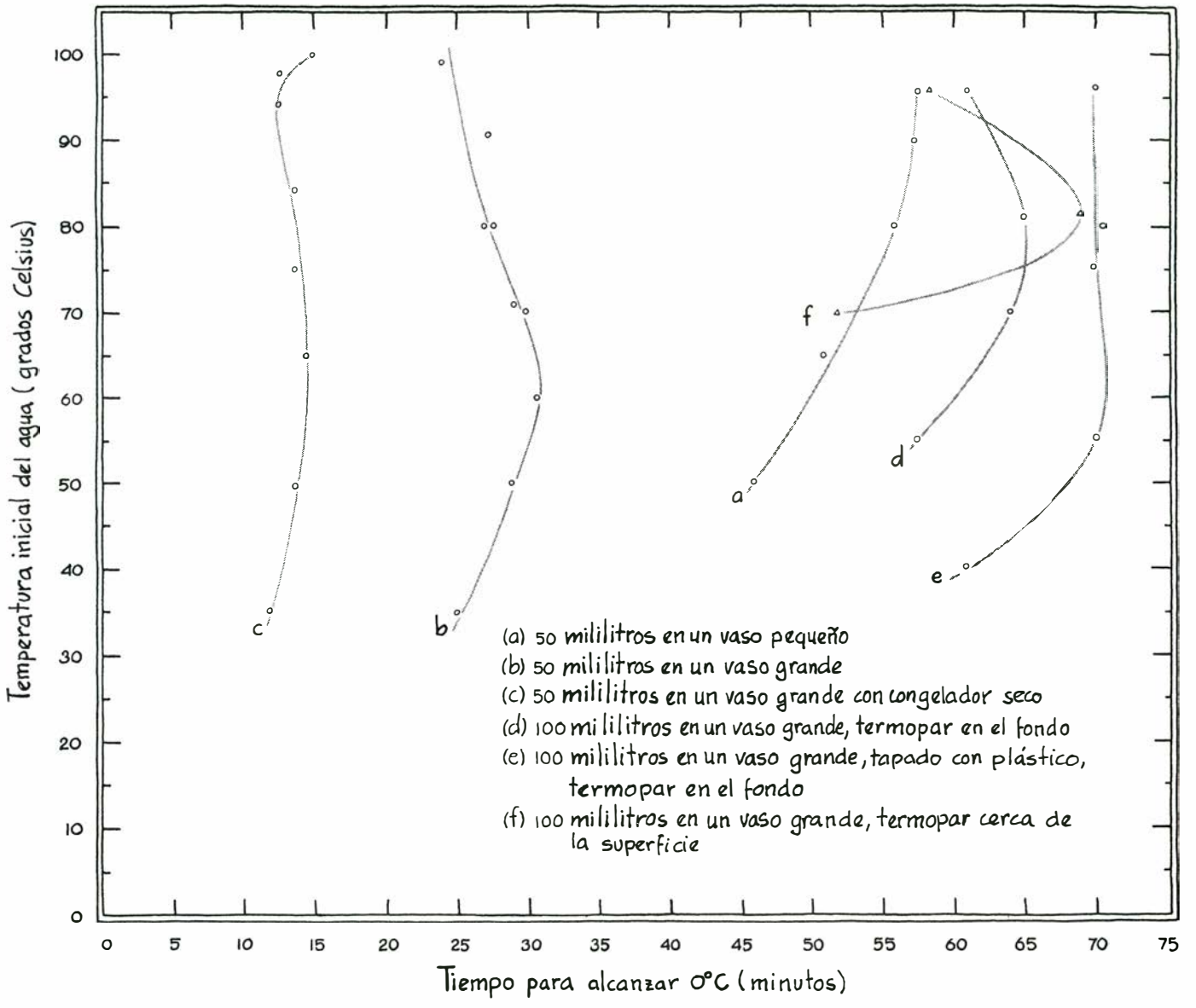
Al parecer, hay varios factores que están implicados en el efecto. En primer lugar, en el recipiente más caliente el líquido puede circular mejor; de esta manera, el agua caliente de la región central se mueve con rapidez hacia las paredes del recipiente o hacia la superficie superior del agua. En segundo lugar, si el agua es más caliente, se puede liberar una mayor cantidad de gas disuelto en el agua. Los gases disueltos retrasan el enfriamiento y, por tanto, su eliminación antes de enfriarse permite que el agua alcance más pronto el punto de congelación. Por ejemplo, es mucho más probable que se congelen las cañerías de agua caliente de una casa que las de agua fría, lo cual se debe a que los gases disueltos en el agua se eliminan en presencia del calor. En tercer lugar, el agua más caliente quizá pierda mayor cantidad de masa y calor al evaporarse que el agua fría. Por ello, habría que enfriar menos masa y se llegaría antes al punto de congelación. Si hay una pérdida significativa de masa, entonces (una vez alcanzado el punto de congelación) el agua que inicialmente estaba más caliente se congelará antes, ya que es menor la masa a partir de la cual se debe liberar el calor para conseguir el paso de agua líquida a hielo.

Voy a describir aquí mis experimentos sobre la congelación del agua y sugeriré otros que se pueden realizar en casa; de cualquier forma, no he sido capaz de resolver la controversia. Eso se lo reservo al lector. Como decía Ian Firth, de la Universidad de St. Andrews, en uno de sus más profundos estudios sobre el tema: "Hay una gran cantidad de variables de experimentación en el problema, de manera que se puede garantizar que los resultados de llevar a cabo el experimento en un laboratorio serán diferentes de los que se realicen en cualquier otro". La primera dificultad con que se encontrará el lector en sus experimentos de congelación será la de estudiar sólo una variable cada vez.

Con el fin de tipificar la clase de recipiente, hice los experimentos con vasos graduados de pirex ordinario. El pirex es material adecuado para este experimento, porque resiste los cambios bruscos de temperatura desde la estufa hasta el congelador, sin romperse. Se colocó una sonda de un termopar en un vaso lleno de agua por debajo del nivel de la misma, y se fijó en una determinada posición. La otra sonda del termopar se introdujo en un baño de agua helada para tener una temperatura de referencia, ya que la temperatura de dicho baño es la de cero grados Celsius. Cualquier cacharro de cocina sirve, a buen seguro, para contener el baño de referencia, aunque lo más conveniente es utilizar un termo. En su interior, el baño de agua helada dura varias horas. Si no quiere tener problemas con el manejo del termopar, puede servirle un termómetro común donde se pueda leer desde 0 hasta 100 °C. Asegúrese de que el depósito de mercurio del termómetro esté totalmente sumergido en el agua.

Para aislar térmicamente el vaso de la escarcha formada sobre la repisa del congelador, usé un tapete de corcho de los que se suelen colocar debajo de los platos calientes. Se obtiene el mismo resultado utilizando poliestireno o cualquier trapo o paño de tela gruesa. Si no aisláramos el recipiente, nos encontraríamos con que el agua más caliente se enfría más rápido, en parte porque funde más rápidamente la escarcha que la rodea. Este aislamiento no es necesario si se trata de un frigorífico de descongelación automática. En mi congelador, la temperatura del aire se situaba entre –8 y –15 grados Celsius. Procure mantener cerrada herméticamente la puerta de su congelador para conservar, en su interior, una temperatura estable.

Al calentar el vaso de precipitados, hágase lentamente, sobre un quemador eléctrico o de gas. A fin de asegurar la calefacción uniforme de toda la masa de agua, ponga una placa metálica plana sobre el quemador; de lo contrario, puede ocurrir que el par termoeléctrico se encuentre situado encima de una porción del quemador particularmente caliente o más fría y dé lugar a lecturas de temperatura erróneas. Se debe tapar el vaso para que el agua evaporada durante la calefacción vuelva a caer en su interior. Lo más aconsejable es trabajar primero con una pequeña cantidad de agua, pongamos unos 50 o 100 mililitros, a fin de reducir el tiempo necesario para la obtención de datos a partir de varias



Experimentos de congelación de agua partiendo desde diferentes temperaturas iniciales

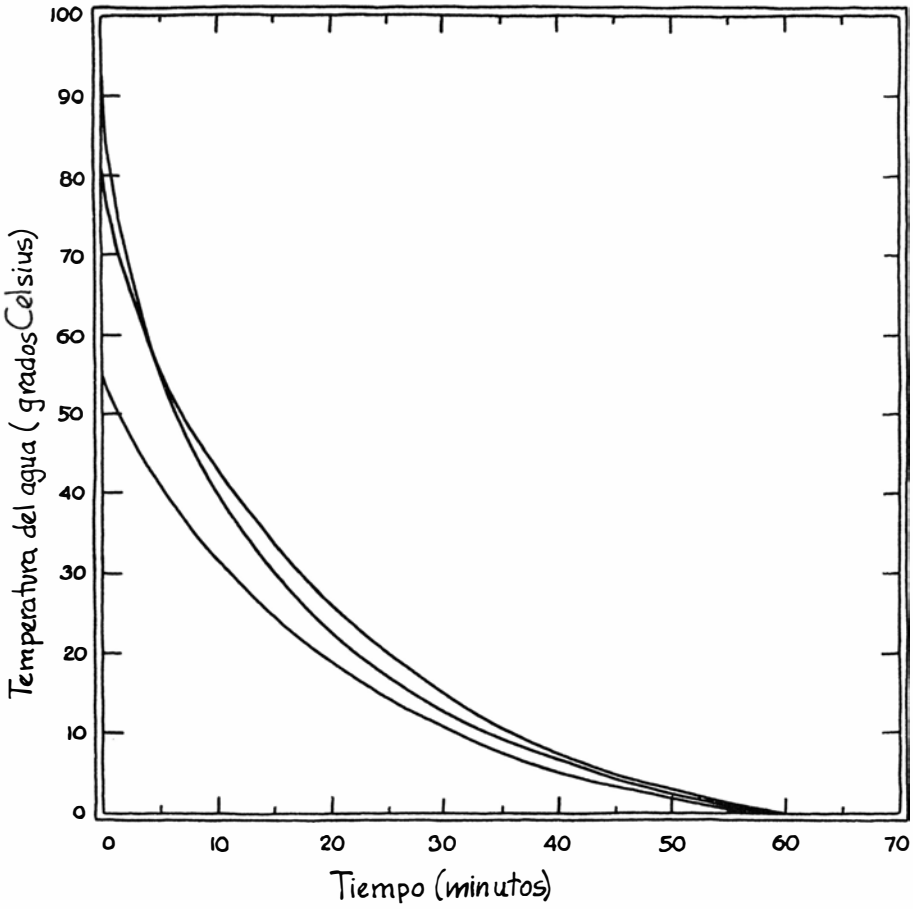
temperaturas iniciales distintas. El factor tiempo también es uno de los motivos por los que se debería practicar varias veces el proceso antes de acometer realmente la toma minuciosa de datos. Yo empecé trabajando con 200 mililitros de agua, tomé datos durante tres días y luego me encontré con que no me había esmerado lo suficiente en el procedimiento. Tuve que desechar todos los datos.

Cuando el agua que está sobre el hornillo alcance la temperatura inicial deseada, se pasa al congelador, junto con la sonda del par termoeléctrico que lleva acoplado; hay que actuar con rapidez porque, en los primeros minutos después de quitar el vaso de la fuente de calor, el agua se enfría en seguida. Si el agua se calienta previamente en una tetera y luego se vierte en el interior del vaso que ya se encuentra en el congelador, tomando entonces una lectura de temperatura, es imposible obtener lecturas correctas. Para entonces, el agua ya se ha enfriado demasiado.

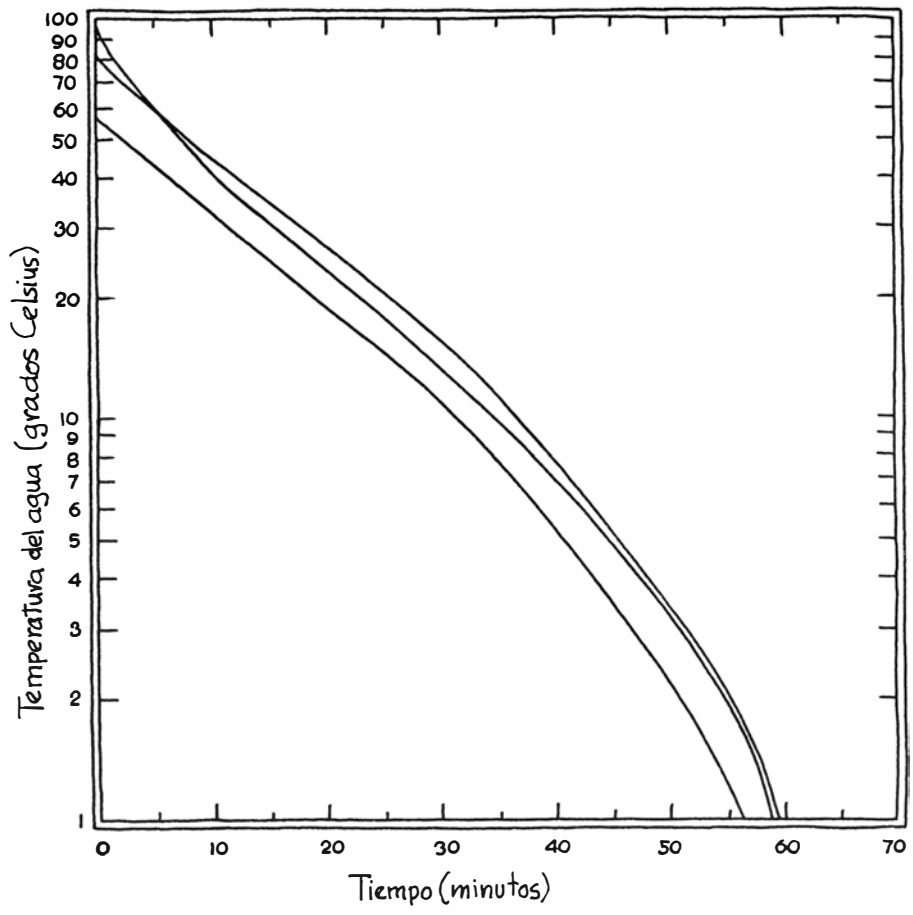
Yo trabajé con agua corriente del grifo; la hervía para eliminar el gas disuelto. Después de cada operación, dejaba que el agua volviera a la temperatura ambiental, antes de añadirle más agua para restablecer el volumen original. La medida de la cantidad de agua necesaria para restablecer el volumen original en el interior del vaso nos da una medida de la cantidad de agua perdida por evaporación durante el proceso de enfriamiento. Comprobé que la manera más precisa y práctica para añadir el agua era inyectarla con una jeringa hipodérmica marcada con una escala en centímetros cúbicos.

La sonda del par termoeléctrico se colocó a distintas profundidades en el interior del agua, a fin de poder controlar la velocidad de enfriamiento a varios niveles de profundidad. Hay que evitar que la sonda quede expuesta al aire durante la operación debido a la caída del nivel del agua por evaporación, porque entonces la sonda sólo mediría temperatura del aire. Si se dispone de un frigorífico de descongelación automática y de un ventilador que se conecte y desconecte automáticamente, es muy posible que se obtenga una oscilación sospechosa en las lecturas de temperatura. En este caso, hay que intentar mantener el ventilador o bien conectado o bien desconectado durante la totalidad del proceso. La corriente de aire creada por el ventilador es un factor significativo en la refrigeración del vaso de precipitados.

En lugar de medir el tiempo necesario para congelar toda la masa del agua, detenía el proceso cuando el par termoeléctrico alcanzaba cero grados Celsius. Para entonces, solía haberse formado una fina capa de hielo en el borde exterior de la superficie del agua. También se podría medir el tiempo hasta la conge-



Datos tomados cerca del fondo en el recipiente que contenía 100 mililitros de agua



Los mismos datos representados en escala semilogarítmica

lación completa, colocando el par termoeléctrico en el centro de la muestra y esperando a que la temperatura empiece a descender por debajo de cero grados Celsius. La temperatura sólo podrá estar por debajo de cero grados cuando el agua se halle totalmente helada.

La mejor forma de comprobar la fiabilidad del procedimiento que se ha seguido es que pueda reproducirse. Sin embargo, por muy reproducibles que fueran mis mediciones, seguía obteniendo grandes desviaciones en alguna operación, lo cual era muy extraño. ¿A qué se debía? No lo sé, pero sospecho que las impurezas del agua alteraban el tiempo necesario para enfriarla.

El primer experimento lo hice con 50 mililitros de agua en un vaso pequeño, graduado hasta 150 mililitros, con un diámetro interno de 5,3 centímetros y una altura de 8,1 centímetros. Utilicé un refrigerador con un congelador no autodescongelable. Una representación gráfica del tiempo necesario para enfriar el agua hasta cero grados Celsius frente a la temperatura inicial del agua presentaba un incremento uniforme hasta los 80 grados de temperatura inicial. Luego, el aumento de la curva de enfriamiento se hacía menos marcado. Lo más decepcionante era que la curva no presentaba una caída en su tramo final, caída que demostraría que el tiempo necesario para una temperatura inicial alta es menor que para una temperatura más baja.

En cambio, al utilizar la misma cantidad de agua en un vaso mayor (graduado hasta 600 mililitros, 8,2 centímetros de diámetro, 12,4 centímetros de altura y la columna de agua alcanzando 0,9 centímetros) y en el mismo congelador, la curva obtenida sí presentaba un codo correspondiente a temperaturas iniciales entre 60 y 65 grados Celsius. Este resultado significa que el agua que inicialmente está a unos 99 grados alcanza el punto de congelación aproximadamente siete minutos antes que el agua que inicialmente está a 60 grados. Es muy probable que, si yo hubiera medido la longitud del proceso hasta la total congelación del agua, el codo de la curva fuera todavía más pronunciado en el supuesto de que la evaporación del agua constituya un factor significativo. A temperaturas más elevadas, la evaporación sería mayor y se perdería más masa, de tal modo que sería menor el calor que debería extraerse del agua a cero grados Celsius para transformarla en hielo.

Los resultados sugieren que la evaporación es importante. Al pasar de un vaso pequeño a otro mayor, la superficie del agua alcanzó una extensión superior en más de dos veces la anterior, y,

por tanto, aumentó cuantitativamente la evaporación. Lo que no sé es de qué modo el acortamiento de la columna de agua afecta a la trayectoria de las corrientes de la convección en el interior del agua. Puede ser que la relación entre el área de la superficie y el área de los lados constituya un valor cuantitativo más significativo para describir el cambio de un vaso a otro. En la superficie del agua, la pérdida de calor se debe principalmente a la evaporación, mientras que por los lados se pierde por convección y radiación. La relación de áreas mencionada aumentó tres veces al pasar de un vaso a otro mayor. Así pues, la evaporación tomó ventaja respecto a la pérdida de calor a través de las paredes del vaso, y quizá sea por este motivo por lo que la curva de tiempo presentaba un codo más cerrado.

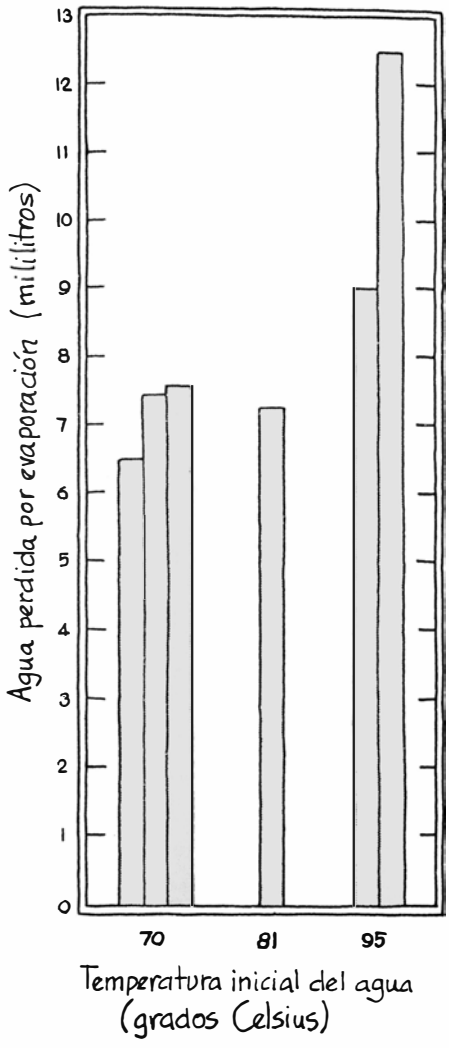
Tomando la misma cantidad de agua en el mismo vaso pero utilizando un frigorífico de descongelación automática, el agua se refrigera en la mitad de tiempo aproximadamente, puesto que hay una corriente de aire constante alrededor del recipiente. En este caso también se puede observar el codo de la curva, que aparece a la misma temperatura aproximadamente. A temperaturas iniciales próximas al punto de ebullición, parece que la curva vuelve a subir. Quizás en este punto el aumento de temperatura empiece a predominar sobre la pérdida de masa debida a la evaporación o sobre el incremento de la circulación del agua. Es posible que usted decida centrar su estudio en este segundo incremento y obtener sus propios datos al respecto; de momento, no hay nada publicado acerca de ello.

Posteriormente, pasé a aumentar el volumen de agua a 100 mililitros, utilizando el vaso de precipitados de 600 mililitros y el congelador inicial (no seco). Tomé datos con la sonda del par termoeléctrico cerca del fondo y luego cerca de la superficie. El fondo dio lugar a una curva con un codo bastante marcado, pero el pico se corrió hacia una temperatura inicial mayor, de aproximadamente unos 80 grados Celsius. El agua que inicialmente se encontraba a 95 grados alcanzaba el punto de congelación unos tres minutos antes que el agua que inicialmente estaba a 80 grados.

Para observar en qué momento el agua inicialmente caliente y el agua inicialmente más fría alcanzaban la misma temperatura en su carrera hacia el punto de congelación, medí la temperatura aproximadamente cada cinco minutos durante los experimentos en que el par termoeléctrico estaba cerca del fondo. Me pareció particularmente interesante la comparación, minuto a minuto, entre la curva de enfriamiento del agua inicialmente a la temperatura de 81 grados Celsius (la que más tarda en alcanzar el punto de congelación) y la curva del agua inicialmente a una temperatura incluso superior: 95,5 grados. El agua que, en un principio, era la más caliente, alcanzaba la misma temperatura que la otra (la de 81 grados iniciales) a los siete u ocho minutos del comienzo de la refrigeración. Posteriormente, la temperatura del agua inicialmente más caliente se mantenía por debajo de la del agua inicialmente más fría hasta unos 15 o 20 minutos antes de la congelación. Poco tiempo antes de llegar a la congelación, la temperatura del agua inicialmente más caliente disminuía bruscamente alcanzando el punto de congelación, mientras que la del agua inicialmente más fría permanecía alrededor de un grado Celsius, durante unos minutos más.

Si la velocidad de enfriamiento fuera exponencial, es decir, si la temperatura del agua dependiera de una función exponencial del tiempo transcurrido, cuando se representaran los datos sobre papel semilogarítmico, darían una línea recta. Al llevar a cabo esta representación, comprobé que la curva de enfriamiento tenía más pendiente en los primeros y en los últimos minutos de cada experimento; en cambio, durante el resto del tiempo la temperatura variaba exponencialmente, pues la representación de los datos producía líneas rectas. Las muestras de agua que empezaban a 81 y 55 grados, respectivamente, presentaban dos regiones en su curva, puesto que, para cada una de ellas, tuve que utilizar dos líneas rectas con pendientes diferentes para unir los datos entre sí. A excepción de los primeros y de los últimos minutos, las curvas de ambas muestras eran paralelas, lo que parecía indicar que en ambos casos había mecanismos de enfriamiento similares. El agua cuya temperatura inicial era de 95,5 grados tenía una pendiente más fuerte en la primera mitad de la prueba, lo que sugería un mecanismo adicional de pérdida de calor que no tenía el agua cuya temperatura inicial era inferior. En otras palabras, por encima de una temperatura inicial de 81 grados Celsius, o bien las pérdidas por evaporación o bien la reciclación aumentan bruscamente de forma significativa y aumenta la velocidad del enfriamiento.

Las mediciones de temperatura tomadas cerca de la superficie del agua mostraron un pico más pronunciado en la curva del tiempo necesario para alcanzar la congelación que en el caso de las mediciones tomadas cerca del fondo. Pero, al parecer, la temperatura inicial del agua que más tardaba en helarse era la misma. Con



Pérdida por evaporación en el experimento hecho con 100 mililitros

una misma temperatura inicial de 70º C, hice dos pruebas para tomar las mediciones de temperatura tanto en la superficie como en el fondo y así ver cómo se diferenciaban dichas temperaturas durante el enfriamiento. Pocos minutos después del comienzo del ensayo, la superficie estaba unos pocos grados más fría. La diferencia aumentó a tres grados hacia la mitad de la prueba y después se redujo otra vez hasta unos pocos minutos antes de que la superficie empezara a congelarse. Sería interesante realizar más mediciones de este tipo, porque las corrientes de convección que se forman en el agua son originadas por la diferencia de temperatura entre la superficie del agua y el fondo. Quizá le guste al lector seguir trabajando sobre esta diferencia de temperatura para determinar la posible influencia de las corrientes de convección en la congelación. Pero le sugiero que en lugar de repetir los ensayos como yo hice, realice una sola prueba sumergiendo en el agua dos termopares con el fin de sacar mediciones de temperatura a diferentes profundidades, a la vez.

Para reducir el efecto de evaporación, por lo menos en lo que se refiere a eliminar la pérdida de masa debida a la evaporación, repetí el ensayo de 100 mililitros de agua en un recipiente de 600 mililitros, con el termopar cerca del fondo; pero esta vez puse sobre el borde del recipiente una bolsa de plástico y la sujeté al mismo con una banda elástica. La evaporación todavía restaba calor al agua, pero la masa evaporada se condensó en el plástico y cayó de nuevo al recipiente en forma de gotas. Para todas las temperaturas iniciales aumentó el tiempo necesario para la congelación. El resultado me indicó que la pérdida de masa durante la evaporación es importante.

Medir la pérdida de masa en ensayos normales deduciendo cuánta agua se necesita para rellenar el recipiente hasta su nivel original no es un proceso muy exacto. Sin embargo, el resultado general es que se pierde más agua cuando la temperatura inicial es más alta. En un estudio teórico de la velocidad de enfriamiento del agua, George S. Kell llegó a la conclusión de que enfriando el agua de 100 a cero grados Celsius la pérdida es de aproximadamente 16 por ciento de su masa, si la principal pérdida de calor es por evaporación. Mis resultados, según parece, coinciden con los cálculos de Kell, lo que nos confirma otra vez que la pérdida de calor y masa por evaporación es un factor importante en el paradójico efecto de congelación.

La recirculación interna del agua que se está enfriando puede ser examinada echando una pequeña cantidad de colorante en el recipiente de agua con una jeringa hipodérmica. El movimiento, a grandes rasgos, es de ascenso por el centro y de descenso por los bordes exteriores. El transporte de calor de esta recirculación está determinado probablemente, por la profundidad del agua, por el área de la sección transversal del recipiente y por la diferencia de temperatura entre la parte alta y la parte baja de la columna de agua.

No conozco ningún cálculo fácil que demuestre cómo influyen estos factores en el transporte de calor y, por tanto, no sé hasta qué punto el efecto de congelación se debe a la recirculación del agua.

¿Cómo influye la superficie en el tiempo necesario para alcanzar la congelación? ¿Existe una relación particularmente ventajosa entre el área de la superficie y el área lateral, que elevara el trazado de las curvas? Si se tuviera acceso a una cámara frigorífica, se podría entrar en ella para medir la pérdida de masa de los recipientes durante el enfriamiento llevando a cabo el experimento sobre el platillo de una balanza. La relación de pérdida de masa con la temperatura del agua en función del tiempo puede ser comprobada por medio de predicciones teóricas.

A Kell se debe una conjetura interesante: una de las razones por las cuales este efecto de congelación ha sido olvidado durante largo tiempo es que la sustitución de las cubetas de madera por las de metal disminuyen o eliminan el efecto. La conducción más rápida del calor a través de las paredes y del fondo del recipiente puede disminuir la importancia de la evaporación en el enfriamiento. Firth, sin embargo, está en contra de esta conclusión. El hecho se podría comprobar usando recipientes del mismo tamaño pero fabricados con distintos materiales, por ejemplo, metal y plástico. También se puede probar con dos recipientes de pirex, colocando una capa de aislamiento térmico alrededor de las paredes y por debajo de uno de ellos.

Los resultados acerca de la pérdida de masa pueden mejorarse cortando los recipientes justos por encima de la línea del agua. Cuando el recipiente se recorta de este modo, el agua evaporada no puede adherirse al mismo para volver a caer dentro de la misma.

Además de eliminar la pérdida de masa poniéndole una tapa al recipiente, también se puede trabajar vertiendo una fina capa de aceite en la superficie. Si el efecto de congelación se debe a la evaporación, lo lógico es que en este caso disminuya.

En mis experimentos, eliminé uno de los principales factores que influyen en la velocidad de enfriamiento del agua del grifo, esto es, el gas disuelto que acarrea dicha agua. Puesto que controlar la cantidad de gas disuelto en el agua sería muy difícil, el lector puede por lo menos intentar hacer el experimento siempre en las mismas condiciones si no deja de utilizar agua del grifo previamente hervida, ya que hay otra cuestión pendiente ¿retrasa realmente el enfriamiento del agua el gas que lleva disuelto?

También se podría estudiar qué ocurre con la velocidad de enfriamiento cuando se le añade sal al agua para rebajar el punto de congelación. Quizás el efecto sea más asombroso si en vez de agua se usara otro líquido (por ejemplo, alcohol) que se evapore más deprisa. El lector logrará congelar el alcohol a no ser que tenga acceso a medios extremos de enfriamiento, tales como nitrógeno líquido, pero a buen seguro el tiempo necesario para llegar a los cero grados manifieste la misma curva ascendente que se observa con el agua.

Taller y laboratorio

El manantial salino y otras curiosidades basadas en las diferencias de densidad de los líquidos

Jearl Walker

El hecho de que el agua salada sea más densa que el agua dulce es la base de numerosos experimentos, algunos de los cuales resultan bastante sorprendentes. Por ejemplo, se puede pensar que si se echa una capa de agua salada encima de otra capa de agua dulce, la salada se mezclaría simplemente con la dulce. Sin embargo, si el agua salada se echa de una determinada manera, el resultado no es tan simple; el sistema comienza a oscilar y puede continuar oscilando durante un tiempo bastante largo.

Eche agua fría del grifo en un recipiente alto de cristal, hasta que esté casi lleno. Tome un vaso de papel o de plástico y hágale un agujero en el fondo con un alfiler o algo que se le parezca. Prepare, con agua del grifo y una cucharadita de sal, una solución salina en cantidad aproximadamente igual a la mitad del volumen del vaso de plástico, teniendo cuidado de que la sal se disuelva totalmente en el agua. Añada a dicha solución un poco de colorante doméstico, de manera que después, cuando el experimento esté en marcha, se pueda distinguir fácilmente la solución salina del agua dulce.

Oscilador de sal elemental

A continuación, comience a sumergir el vasito dentro del recipiente alto, vertiendo simultáneamente la solución salina dentro del vasito. Sumerja éste hasta una profundidad en la cual el agua le llegue, por fuera, hasta la mitad y el agua salada del interior alcance aproximadamente el mismo nivel. En este momento se deberá sujetar el vaso, ya que su posición es inestable. Yo lo sujeté con un sujeta-recipientes acoplado a un vástago vertical apropiado, del tipo de los que se usan en los laboratorios de química, pero se puede tratar de mantener quieto el vaso pegándolo con cinta adhesiva a las hojas de dos cuchillos de cocina, que se colocan atravesados en la parte superior del vaso.

Se podría suponer que, en esta situación, la solución salina teñida saldría a través del agujero para mezclarse con el agua dulce, hasta que el nivel de aquélla dentro del vaso fuera tal que la presión hidrostática en el agujero debida a dicha altura fuera la misma desde ambos lados, es decir, desde el lado del agua dulce y desde el lado de la salada; en ese instante, el flujo de solución salina se iría haciendo cada vez más pequeño hasta desaparecer. Eso es lo que puede observarse realmente durante varios minutos, pero el experimento no acaba ahí. Muy pronto, el flujo de agua salada comenzará a hacerse visible de nuevo. A partir de ese momento, y durante un período de unos 15 a 20 segundos, el flujo se reanudará bruscamente, disminuirá y desaparecerá, para volver a empezar de nuevo intensamente.

Lo que ocurre es que, durante el período de tiempo en que el flujo de la solución teñida no resulta visible, el agua dulce está ascendiendo hacia el vaso menor a través del agujero. El sistema se halla en oscilación. Este efecto fue descubierto, en 1970, por Seelye Martin, de la Universidad de Washington.

El período de oscilación depende principalmente del tamaño del agujero y, en menor proporción, de la concentración de sal en el vaso. Mi oscilador continuó toda la noche, con aproximadamente el mismo ciclo, a pesar de la continua reducción de la concentración salina debida a la dilución por mezcla. El oscilador de Martin, construido de hojalata en vez de plástico, duró cuatro días. También repitió el experimento con una jeringa hipodérmica en substitución del vaso; obtuvo así un período de cuatro segundos aproximadamente con una duración del oscilador de 20 ciclos.

La primera parte del flujo se entiende fácilmente. En un principio, el agua salada tiene dentro del vaso la misma altura que el agua dulce del exterior. Dado que la solución salina era más densa que el agua dulce, la presión en el agujero era mayor por la parte de aquélla que por el lado de ésta. La solución salina, por tanto, se vaciará a través del agujero hasta que las presiones se nivelen. La cuestión a resolver es por qué no se estabilizó la solución salina cuando el flujo descendente fue debilitándose hasta detenerse.

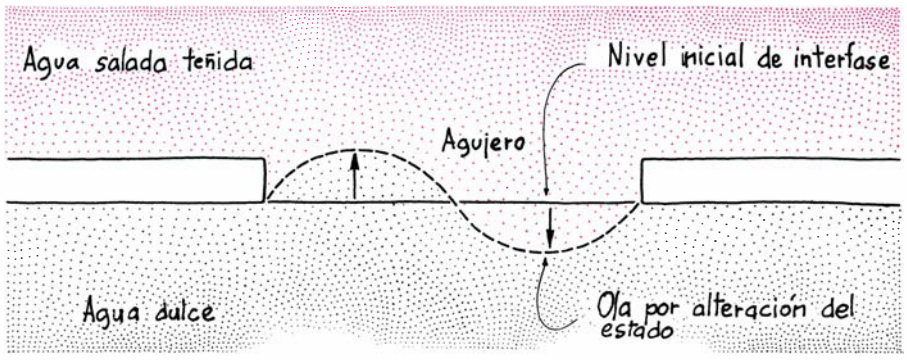
A pesar de que las presiones se hallen igualadas en el agujero, una capa de líquido más denso que esté cubriendo a otra capa de líquido más ligero se encuentra en un equilibrio inestable y, por tanto, expuesta a que cualquier trastorno fortuito, por pequeño que sea, descomponga el sistema. Cualquier alteración de esa índole creará una pequeña ola en la interfase entre las dos clases de líquidos. A causa de la diferencia de densidad, la ola crecerá en amplitud exponencialmente con el tiempo, por lo menos al principio. En consecuencia, porciones del líquido menos denso sobresaldrán cruzando la interfase anterior y porciones del líquido más denso se hundirán. Tal inestabilidad debida a una causa fortuita y la intromisión resultante de cada líquido en la región del otro son las responsables de las oscilaciones del oscilador salino.

Las pequeñas porciones de agua dulce que se introducen en la interfase cruzan rápidamente por el agujero, porque son menos densas que la solución salina que se encuentra a su mismo nivel y al otro lado del agujero. Al parecer, la corriente de agua dulce impide pronto el

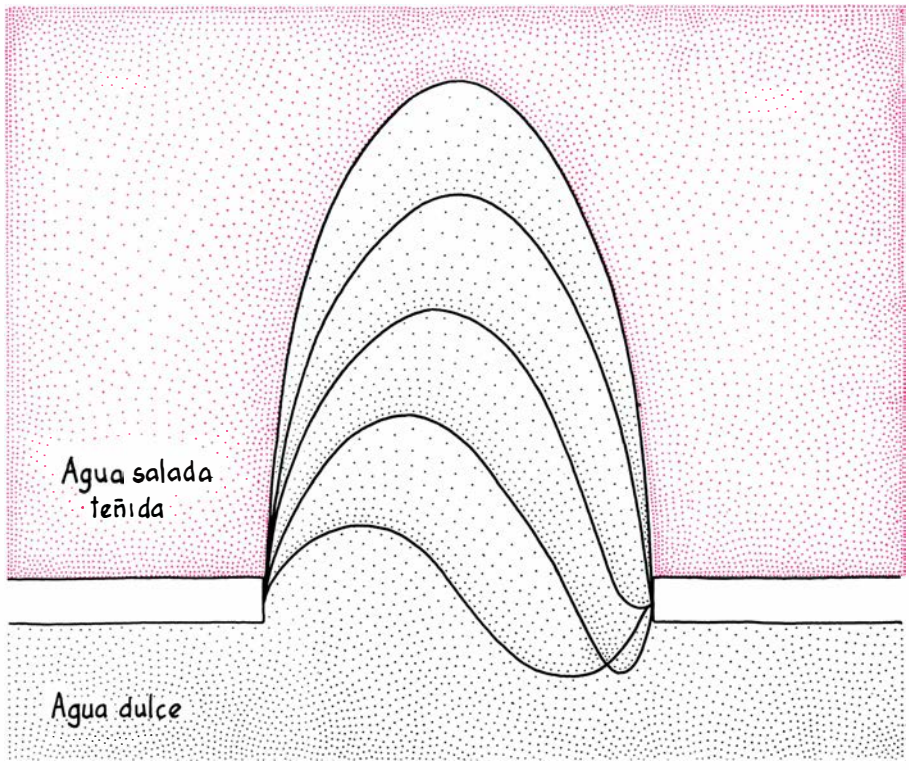
paso de la corriente de agua salada; a partir de entonces, sólo habrá una corriente a través del agujero, que será la corriente de agua dulce en dirección ascendente. Esta incorporación de agua dulce en el vaso mayor irá incrementando gradualmente la altura de líquido en el mismo y, como consecuencia, la presión hidrostática a nivel del agujero. La pérdida de agua en el vaso grande apenas disminuirá el nivel de agua en él, debido a que es mucho más ancho que el vasito de plástico. Puede ocurrir que la presión por el lado de la solución salina llegara a ser lo suficientemente grande a nivel del agujero como para ir dificultando, e impedir por último, la corriente ascendente de agua dulce. En este momento estamos volviendo al punto de partida de un nuevo ciclo. Ahora hay demasiada agua en el vaso pequeño; aparece entonces una corriente de agua salada en dirección descendente durante un rato. Gradualmente, el flujo de dicha corriente va disminuyendo a medida que la presión va haciéndose igual a la altura del agujero. En ese instante, cualquier trastorno fortuito dará lugar a la aparición de una ola en la interfase, que otra vez mandará hacia arriba una corriente de agua dulce. Con una frecuencia que dependerá del diámetro del agujero, del diámetro del vasito y de la viscosidad del agua, la corriente irá alternativamente hacia arriba y hacia abajo. Ya tiene el lector un oscilador salino.

La inestabilidad de la interfase entre un líquido más denso que está sobrenadando a otro líquido menos denso, es decir, cuando la interfase está en equilibrio hidrostático se llama "inestabilidad Rayleigh" (a veces "inestabilidad Rayleigh-Taylor). El oscilador salino es un ejemplo de un sistema que oscila estimulándose a sí mismo, en este caso a través de la "inestabilidad Rayleigh" y el consecuente desarrollo rápido de un trastorno que se produce en la interfase entre los dos líquidos.

Al parecer, los trabajos de Martin es lo único que se ha publicado sobre los osciladores salinos. Tal vez al lector le interese seguir trabajando sobre ellos. Por ejemplo, ¿cómo varía el período de oscilación con respecto al diámetro del agujero? La forma de trabajar de Martin, usando una jeringa hipodérmica con su correspondiente aguja, es muy ventajosa; en efecto, puede contar con agujas de diferentes diámetros fácilmente intercambiables, se conoce exactamente el diámetro de las mismas y la sección circular es mucho más precisa que la de nuestro agujero hecho con un alfiler. El lector puede comprobar la dependencia general del período respecto del diámetro del orificio, entreteniéndose en hacer una serie de agujeros con el alfiler.



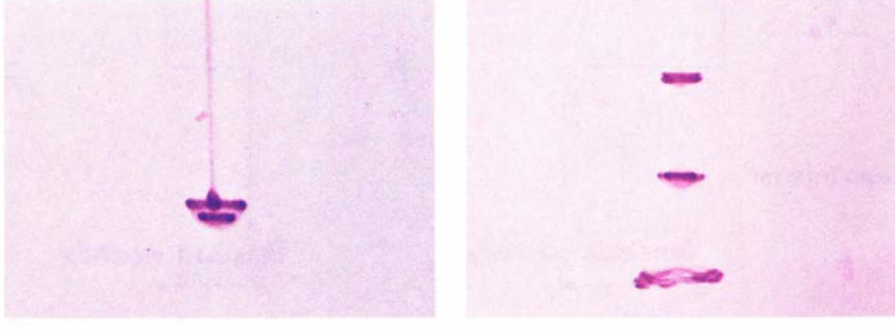
Empieza una oscilación



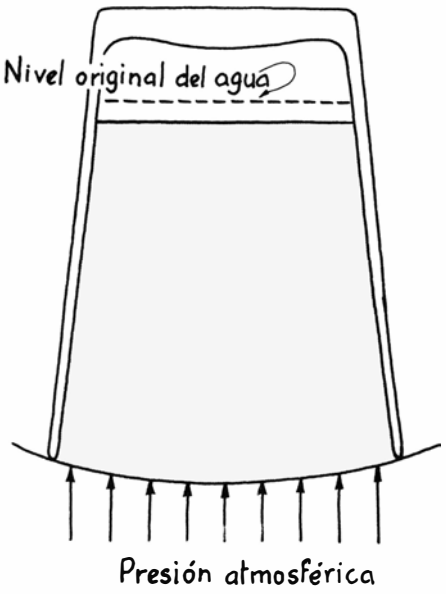
Un chorro ascendente de agua dulce empuja al chorro descendente de agua salada

Puede estudiarse la dependencia del período de oscilación con respecto a la concentración de la solución salina. Se parte de una solución salina débil en el vasito y se le va añadiendo sal, teniendo cuidado de que ésta no obstruya el agujero.

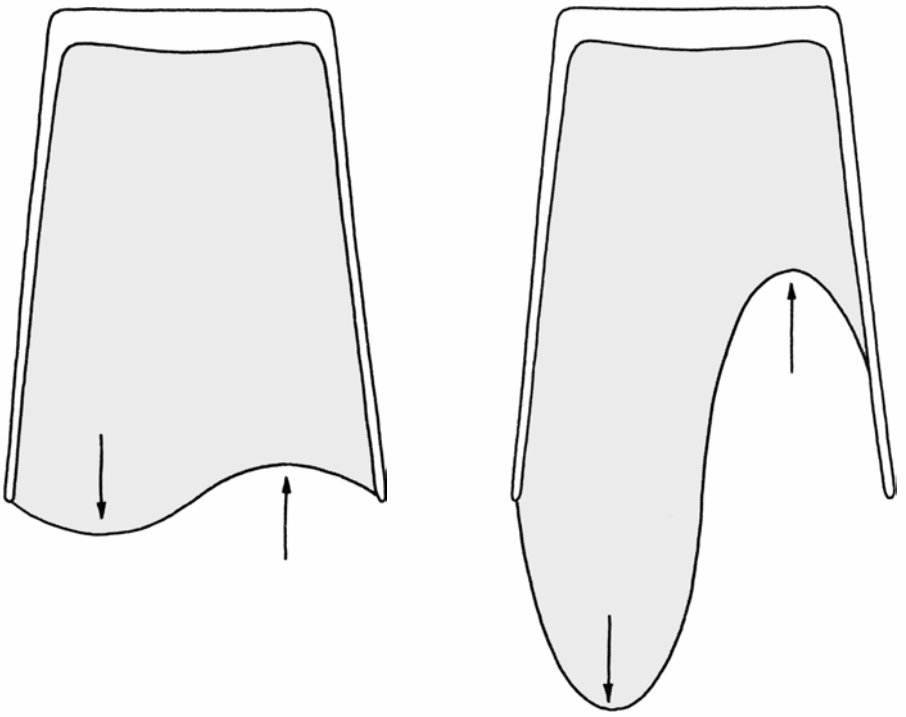
También puede el lector ensayar con otros líquidos. No tienen por qué ser solubles uno en el otro, todo lo que se les exige es que uno sea más denso que el otro, y que el más denso se coloque den-



Formas de la corriente descendente



El juego del vaso invertido

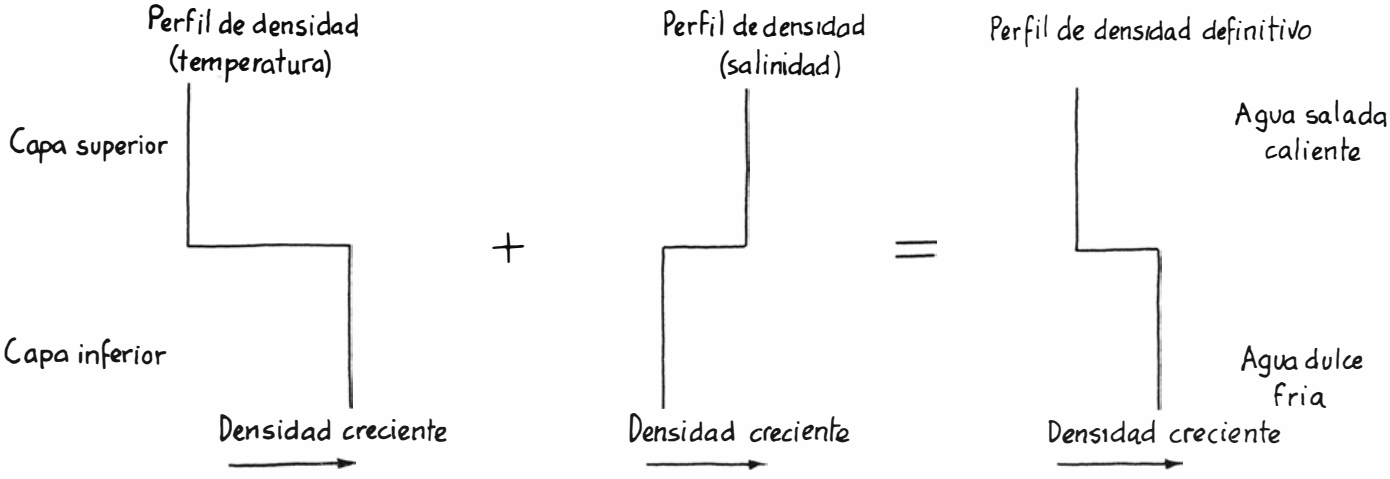


La acción conjunta del aire y del agua hacen que ésta caiga

tro del recipiente menor. Yo ensayé con agua y almíbar ligero de cereales (almíbar claro de los que se usan en cocina y repostería); teñí el almíbar de rojo claro antes de verterlo en el vasito. Con un agujero de tamaño adecuado, las oscilaciones del líquido rojo viscoso y del agua dulce fueron casi espectaculares. La estela ascendente se dejaba ver mejor en el oscilador de almíbar que en el oscilador salino. Teñí ligeramente de azul el agua dulce y pude ver con facilidad la estela ascendente de agua dulce que penetraba periódicamente a través del agujero, abriéndose camino hacia arriba por entre el almíbar para luego extenderse por encima de éste.

Cuando empieza la corriente descendente durante el ciclo del oscilador salino, la solución salina teñida parece como si estallase hacia abajo, tomando la forma de un paraguas invertido. Durante la parte del ciclo en la que el flujo es más estable y la corriente fluye sin oscilaciones, el chorro desciende varios centímetros, para separarse luego en anillos concéntricos. Los anillos se parecen a las volutas que hacía mi abuelo con el humo de su puro en los tranquilos días de Aledo, Texas, cuando aquellos anillos de humo eran nuestra única diversión. Los anillos corren uno tras otro, se anudan entre sí y después desaparecen. Este espectáculo se contempla mejor con los anillos de agua teñida, si se usa un recipiente circular de cristal, una taza grande de té, ya que la superficie curva del recipiente aumenta la imagen.

Otro ejemplo de inestabilidad tipo Rayleigh puede observarse en un juego de salón muy común. Se llena parcialmente un vaso de agua, se coloca un trozo de papel sobre el borde y, manteniendo con la mano el papel en su sitio, se invierte el vaso lleno de agua. Después se retira la mano que sostiene el papel; el agua permanecerá en el vaso gracias a dos efectos: primero, a que la tensión superficial entre el agua y el papel y entre el agua y los bordes del vaso ayudan a mantener el papel en su sitio; segundo, porque al descender un poco la columna de agua en los vasos grandes se reduce la presión del aire que permanece atrapado en el vaso. La diferencia de presión del aire entre la parte superior y el fondo de la columna



Perfiles de densidad cuando una capa de agua caliente salada se extiende por encima de otra de agua dulce fría

de agua ayuda también a mantener el agua en su sitio.

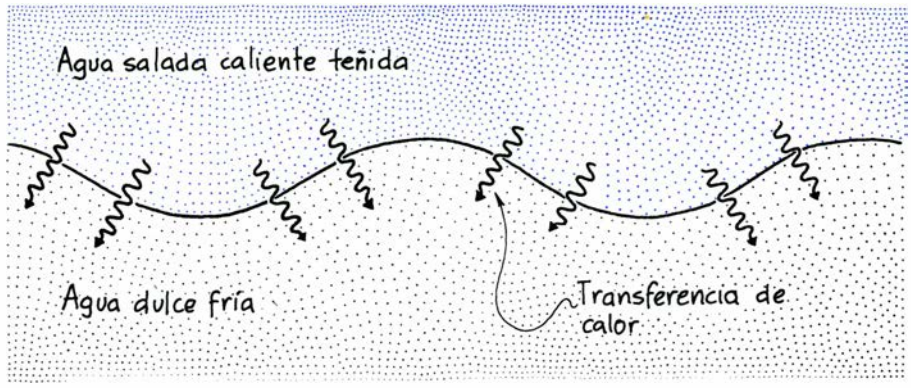
Supongamos que el papel desapareciera de repente sin alterar la superficie del agua, ¿qué ocurriría? El sentido común nos dice que el agua caería; ahora bien, si no hubiera nada que turbara la superficie del agua, no habría ninguna razón para que el agua cayera. Bastaría la diferencia de presión entre la parte alta y el fondo de la columna de agua para mantener el agua en el vaso.

Sin embargo, el agua cae debido a que no permanece en reposo absoluto. Inmediatamente después de que el papel se hubiere retirado, se provocaría una pequeña ola en la superficie del fondo provocada por cualquier accidente fortuito que rompiera el estado de reposo del agua. La ola crecería en amplitud, al principio de forma exponencial con el tiempo, exactamente igual a como habíamos visto en la interfase del oscilador salino, puesto que nos encontramos otra vez ante otro caso de equilibrio inestable tipo Rayleigh. Una burbuja de aire subiría por un lado de la columna de agua, a medida que parte del agua comenzara a bajar por el otro lado, con lo que rápidamente nos encontraríamos con el suelo mojado.

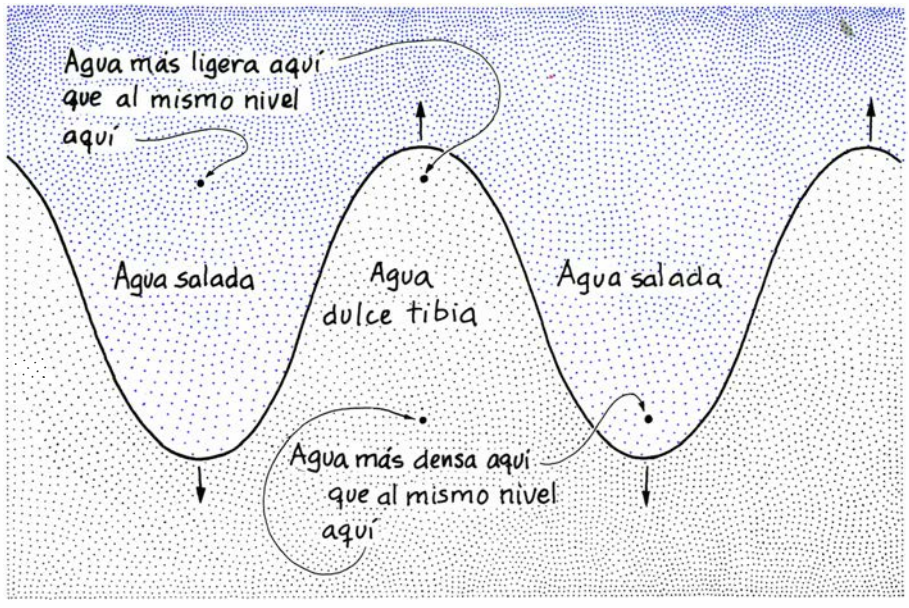
Los "dedos de sal" suponen la existencia de una capa de agua salada sobre otra de agua dulce, similares a las capas existentes en un oscilador salino. Aunque los "dedos" no tienen la fascinación de las oscilaciones, son muy importantes en la microestructura del océano. Consideremos una capa de agua caliente salada sobre otra capa de agua dulce más fría. La sal hace que la capa superior sea más densa que la inferior, pero la diferencia de temperatura compensa de sobra dicha diferencia dando lugar a una situación en la que la capa superior es menos densa que la capa inferior.

Podría suponerse que si una leve alteración enviara parte de la capa superior hacia abajo y parte de la capa inferior hacia arriba, la diferencia de densidades en el conjunto restablecería las interfases originales. Por ejemplo, si la solución salina caliente se moviera hacia abajo sumergiéndose en la capa de agua dulce fría, se encontraría rodeada de un líquido más denso que ella y flotaría de nuevo en dirección ascendente.

Pero si, debido a un trastorno en la interfase, se produce la mezcla de líquidos antes referida, rápidamente se lleva a cabo un intercambio de calor entre la solución caliente y el agua fría. La solución caliente desprende calor al moverse hacia abajo y el agua fría lo absorbe en su desplazamiento hacia arriba. A consecuencia de lo cual, la parte de solución salina que se introduce en la capa inferior se enfría de repente, haciéndose más densa que el agua que la rodea y, en vez de volver a flotar hacia arriba, sufre un impulso hacia abajo. De igual manera, la parte de agua fría que asciende introduciéndose en la capa superior se calienta rápidamente haciéndose menos densa que la solución salina caliente que la rodea y acelerando su movimiento hacia arriba. El trastorno inicial registrado en la interfase entre las dos capas queda, por tanto, agrandado produciendo "dedos" de solución salina que se extienden hacia abajo y agua dulce que empuja hacia arriba. Con el tiempo, los "dedos" se irán alargando por sí solos hasta un punto en donde se doblen para formar una capa de mezcla de agua con una salinidad y temperatura que serán intermedias entre las de las capas superior e inferior.



Comienzo de un desequilibrio fortuito en la interfase de las capas



Incremento de la ola a medida que el calor se difunde más rápidamente que la sal

Los "dedos de sal" no se observan directamente en el océano, aunque sí han sido detectados los perfiles resultantes de temperatura y salinidad. Por ejemplo, las aguas salinas y calientes del Mediterráneo reúnen las condiciones necesarias para formar "dedos de sal" a su paso por el Estrecho de Gibraltar, al fluir sobre la corriente de agua menos salada y más fría procedente del Atlántico. Tomas de muestras hechas para medir la salinidad y la temperatura en función de la profundidad revelan unos perfiles en forma de escalones en los que la salinidad y la temperatura decrecen con la profundidad. Dichos escalones tienen cada uno una capa cuya alta salinidad y temperatura son más elevadas que la capa inferior, y existe entre ambas una capa de valores intermedios.

El lector puede producir "dedos de sal" muy fácilmente en su cocina vertiendo cuidadosamente agua caliente salada (teñida con colorante doméstico) sobre agua dulce más fría. Al echar el agua, se debe tratar de reducir al mínimo la turbulencia que se origina en la mezcla de los dos tipos de agua. Si el recipiente es un vaso común, yo lo in-

clino para que el agua caiga a sólo un centímetro o menos. Si el recipiente es mayor, bajo el vaso del agua salada hasta casi el nivel del agua dulce. También se puede hacer flotar un trozo de madera en la superficie del agua dulce y echar la salada sobre el trozo de madera.

Al principio, la interfase entre el agua caliente salada y teñida y el agua dulce limpia sólo indica algo de mezcla. En pocos minutos se desarrollarán en la interfase los "dedos de sal", de uno a cinco centímetros de largo y de un milímetro de ancho, más o menos. Su duración puede variar desde varios minutos hasta unas horas. Para observar mejor los "dedos" hay que enfocarlos con una linterna a través del agua y en dirección a los ojos.

La clave de los "dedos de sal" es la diferencia en la velocidad de difusión del calor y la sal. El calor que hizo la capa superior más ligera, a pesar de su concentración salina, se mueve hacia el agua dulce más fría unas 100 veces más deprisa que la sal. La rápida transmisión del calor permite que el agua salada de movimiento descendente se torne de repente más pesada que su entorno, y que el agua dulce de movimiento ascendente resulte más ligera que el agua que la rodea.

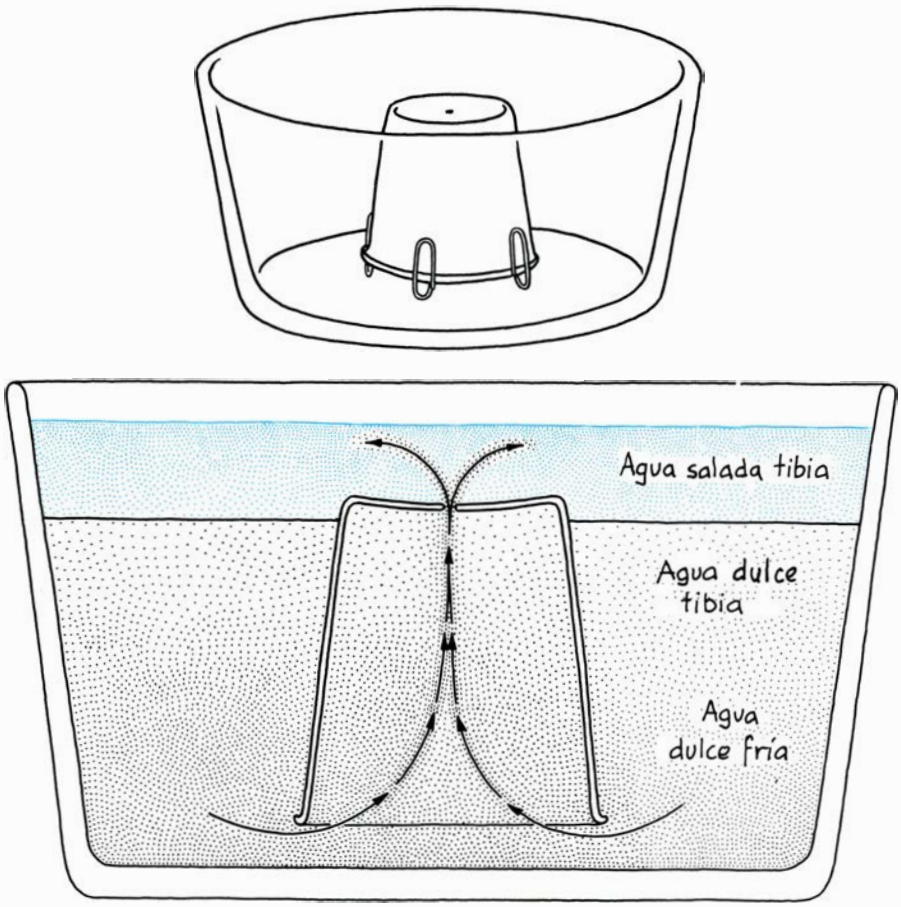
Se puede hacer también el mismo tipo de "dedos" convectivos con soluciones de azúcar y sal. Para que la solución de azúcar sea menos densa que la solución de sal, se echa una cantidad de azúcar inferior a la de sal en un volumen determinado de agua. Tiña la solución azucarada, de manera que pueda seguirse su movimiento; vierta suavemente la solución de azúcar sobre la de sal en un recipiente. Puesto que las dos soluciones están a la temperatura del agua fría del grifo, estos "dedos de sal" son más fáciles de hacer en la cocina que el experimento anterior, en el que el enfriamiento rápido del agua caliente puede constituir un problema.

Una vez más, como sucedía con la disposición del agua caliente salada y el agua corriente fría, las capas de solución de azúcar y sal deberían ser estables, porque la capa superior es la menos densa. Sin embargo, cualquier movimiento inicial se verá incrementado en virtud de la diferencia que existe en la velocidad de difusión: la sal se difunde más rápidamente que el azúcar. Por ello, cuando el movimiento inicial envía una pequeña cantidad de solución de azúcar hacia abajo, la sal de los alrededores ocupa su lugar antes de que el azúcar pueda hacerlo. La porción de agua con más sal es de repente más densa que su entorno, y precipita hacia abajo produciendo un "dedo". De forma similar, una pequeña porción de agua salada de movimiento ascendente pierde sal más deprisa que gana azúcar; por ello, resulta más ligera que su entorno y sufre una aceleración hacia arriba para producir un "dedo".

La acción conjunta de sal y calor en la densidad del agua de mar y la diferencia en su velocidad de difusión conducen también a una curiosa fuente "perpetua" que el lector puede simular en su cocina. En un océano tropical, el agua próxima a la superficie puede estar relativamente caliente y salada, mientras que el agua próxima al fondo está relativamente fría y sin sal. Imagínese una tubería colocada verticalmente casi hasta el fondo y una bomba que se usaría, inicialmente, para subir agua del fondo a la superficie. En teoría, la bomba podría quitarse y el manantial continuaría por sí solo. Dado que una tubería difícilmente podría alterar las características del océano, este chorro continuaría fluyendo "siempre".

Para entender cómo se autobombea el manantial, consideremos una pequeña cantidad de agua que empieza a subir por la tubería. A medida que esa pequeña cantidad de agua fría ascienda, irá ganando calor gradualmente del agua más caliente que rodea a la tubería a la misma profundidad. La porción de agua interior sería entonces más ligera que el agua más salada a la misma profundidad y temperatura, pero exterior a la tubería. En consecuencia, el agua de la tubería aceleraría su ascenso. Teniendo en cuenta que la pequeña porción de agua se iría calentando continuamente de esta forma a lo largo de su ascenso, siempre resultaría más ligera que el agua del exterior y seguiría acelerándose en su ascenso. En principio, el agua subiría un par de metros por encima de la superficie del océano formando una fuente perpetua.

Hace algunos años, Henry M. Stommel, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, intentó poner en marcha la fuente mencionada en las profundidades oceánicas inmediatas a la isla de la Martinica. Con unos 1000 metros de manguera flexible, de 18 centímetros de diámetro, él y sus colegas consiguieron hacer una fuente de unos 60 centímetros de altura, pero dudaban de que fuera el resultado de diferencias de densidad. La punta de la manguera estaba sujeta a un flotador que subía y bajaba con las olas, estirando la parte alta de la manguera y creando una especie de acción de bombeo. Stommel piensa que la fuente se debe a la acción de bombeo.



Disposición para generar una fuente salina

Para simular la fuente incesante en su cocina, llene parcialmente un recipiente ancho con agua del grifo. Haga un agujero en el fondo de un vaso de papel o de plástico y póngalo en el agua boca abajo. Después, eche cuidadosamente agua caliente sobre el agua fría en el exterior del vaso. Trate de evitar la mezcla excesiva de las dos capas. Continúe vertiendo agua hasta que la adición de agua caliente haya forzado al agua fría a subir dentro del vaso invertido hasta el nivel del agujero.

Vierta entonces una capa fina de agua caliente salada sobre la superficie del agua caliente y también sobre el vaso, teniendo cuidado otra vez de evitar la mezcla excesiva. Ponga una o dos gotas de colorante justo sobre el agujero del vaso invertido. El colorante le mostrará que una fuente lenta de agua fluye desde el agujero a través de la capa alta de agua; se obtiene, pues, una réplica de la fuente de sal oceánica. El agua que sube a través del vaso se va calentando hasta que alcanza aproximadamente la misma temperatura que el agua situada a la misma profundidad fuera del vaso, pero no tiene la sal que posee el agua de fuera, y es, por tanto, más ligera que ella. Ello explica que el agua del vaso se sienta obligada a ascender a través del agujero. La fuente continuará manando hasta que el calor y la sal se distribuyan más regularmente.

Como nota final de los efectos debidos a la diferencia de densidades del agua salada y la dulce, permítanme describir el empuje que recibe un barco cuando las compuertas de la última esclusa del Canal de Panamá se abren. A medida que un barco se va acercando a la orilla del Pacífico del Canal, va descendiendo progresivamente, a través de las esclusas, hasta el nivel del mar. La mayor parte del agua de estas esclusas es agua dulce aportada por los lagos de Panamá, que a su vez se nutren del agua de lluvia.

En cada esclusa el barco tiene que esperar hasta que el nivel del agua desciende hasta el de la siguiente esclusa. Entonces, la presión del agua en los dos lados de la compuerta que separa las dos esclusas es la misma y la compuerta se abre con facilidad.

En la última esclusa, el agua del otro lado es la salada del océano. Dado que el agua salada es más densa que el agua dulce, la presión de equilibrio en la puerta se alcanza cuando el agua dulce está todavía un poco por encima del nivel del océano. Cuando la compuerta se abre, esta altura de más del agua dulce corre hacia el mar arrastrando el barco con ella en un breve y gratuito paseo.

Taller y laboratorio

Maravillas de la física que pueden hallarse en una taza de café o de té

Jearl Walker

En una época en la cual la mayoría de los hallazgos de la ciencia se dan en cosas que son totalmente extrañas a nuestro quehacer diario –las partículas fundamentales de la materia, la actividad que se desarrolla en el interior de las células vivas o el singular comportamiento de lejanos objetos celestes–, se tiende a no prestar atención a las oportunidades de estudiar hechos científicos que se producen delante de nuestra mirada. Este mes he reunido varios ejemplos, basados en una cosa tan sencilla como una taza de café o de té. Sin duda, el lector se habrá encontrado con algunos de ellos, pero es posible que no les haya prestado demasiada atención.

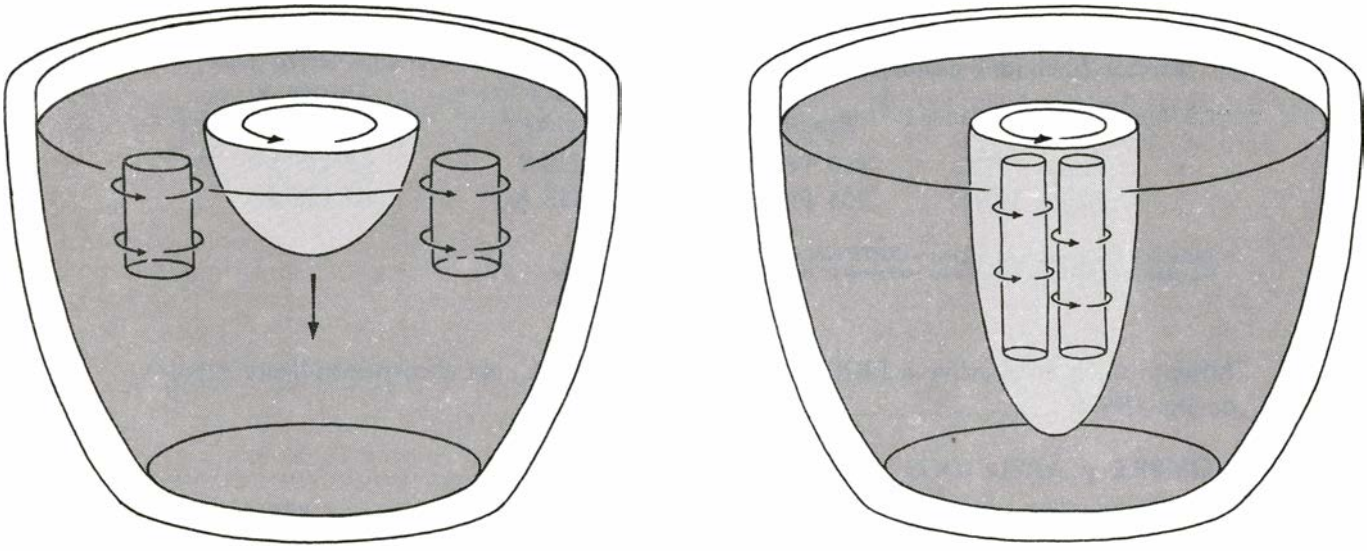
Una noche ya avanzada, mi amigo John Hudak –por evadirse unos minutos del trabajo de su tesis doctoral– estaba distraídamente disolviendo café instantáneo en un tazón de agua caliente; al agitarlo, sonaba un tintineo debido a los choques de su cuchara metálica con el fondo del tazón. El tono del tintineo descendió bruscamente al echar el polvo de café en el agua, lo cual significaba que las ondas sonoras se habían hecho más largas y que había decrecido la frecuencia. Como Hudak continuó un rato removiendo hasta que el polvo se mezcló, la frecuencia incrementó lentamente hasta alcanzar el valor inicial. Obtuvo los mismos resultados cuando añadió una cucharada de un sucedáneo de nata en polvo. En realidad, cualquier polvo disuelto en agua caliente provoca un cambio en la frecuencia del mismo tipo.

Antes de que se añada ningún tipo de polvo, se oye un sonido peculiar debido al tintineo, ya que la cuchara provoca ondas estacionarias que resuenan a través de la columna de agua y de las paredes del tazón. Las ondas son similares a las que resuenan en un órgano, las cuales son las responsables del sonido que se escucha en el concierto y que sale de los tubos. Sin embargo, los armónicos de frecuencia son un poco más complicados de calcular en una taza de café que en los tubos de un órgano. Las frecuencias dependen del espesor y del radio del tazón, de la densidad y elasticidad del material de que está hecho dicho tazón, del radio de la columna de líquido y de la velocidad de propagación del sonido en dicho líquido.

Lo primero que pensé fue que el polvo, al posarse encima del agua, influiría en la determinación de la frecuencia de resonancia del tazón. Pero resulta que lo único que hace cualquier capa de polvo sobre el agua es amortiguar las oscilaciones en el tazón y, como consecuencia, apagar el ruido del tintineo; no cambia, sin embargo, la frecuencia de resonancia. El polvo se disuelve con cierta rapidez.

Cuando al principio se disuelve el polvo, los gránulos del mismo liberan pequeñas burbujas de aire. La velocidad del sonido es considerablemente menor en el aire (unos 340 metros por segundo) que en el agua (1450 metros por segundo, aproximadamente); las burbujas frenan la velocidad del sonido en el líquido. Si el volumen de las burbujas es la centésima parte del volumen del líquido, la velocidad del sonido se reduce 30 veces. En consecuencia, la frecuencia de cualquier onda estacionaria se hace menor cuando se liberan las burbujas. Como éstas van desapareciendo, gradualmente, la velocidad del sonido (y, por tanto, la frecuencia de la onda estacionaria producida por el tintineo) retorna a su valor normal.

Un cambio similar de frecuencia puede observarse en un vaso de cerveza recién llenado. Conforme las burbujas de aire de la cerveza (no la espuma de encima) se van disipando, el tono del sonido producido por una cuchara al golpear contra la pared del vaso va incrementándose lentamente.



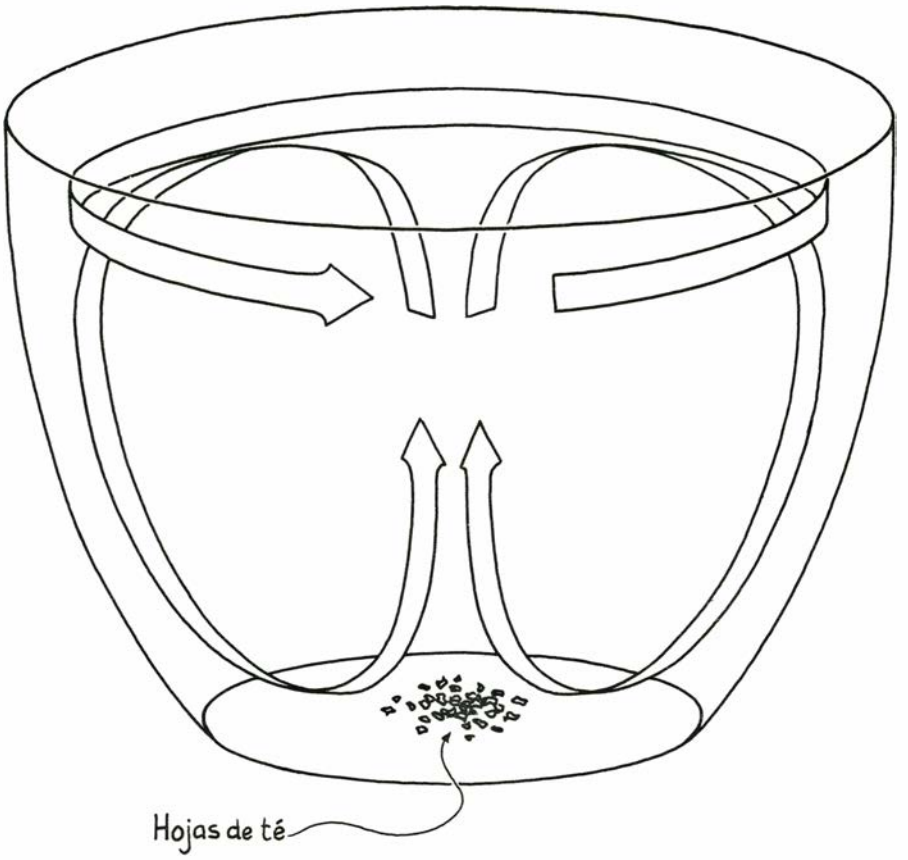
Alargamiento de los torbellinos cuando se vierte leche fría o nata en café caliente

Otro experimento bastante simple con una taza de café sirve como modelo aproximativo de los movimientos de torbellinos o remolinos que tienen lugar a escala mucho mayor en la atmósfera (torbellinos de polvo, tornados, fuegos y huracanes). Remuévase suavemente una taza con café caliente o con té caliente, sáquese la cuchara y a continuación viértase con cuidado leche o nata fría en el centro de la taza. Si el removido y el vertido se han hecho con cuidado, se desarrollará un remolino en el centro del café, el cual se podrá observar por dos razones. En primer lugar, la velocidad angular del fluido es mayor en el centro que justo fuera de la región donde hemos vertido la leche. En segundo lugar, el remolino puede desarrollarse con tanta exactitud que en el centro de la superficie se produzca un hoyito. Estas características no aparecen si la leche está templada o caliente; en ese caso, lo que ocurre es que la velocidad angular en el centro decrece.

Los resultados diferentes que se obtienen al usar leche caliente o leche fría provienen de la diferencia de densidad que ambos líquidos tienen con respecto al agua caliente de la taza. La leche fría es más densa que el agua y por eso se hundirá cuando se eche el agua. Al hundirse, la corriente descendente captura pequeños remolinos verticales que existen en el líquido que la rodea, tirando de ellos hacia el centro y (como término medio) estirándose. La velocidad angular del fluido en la columna aumenta entonces, provocando que el fluido en el centro de la taza haga remolinos más rápidamente que el fluido fuera de la zona ocupada por la leche.

Si la leche está bastante caliente, puede ser más ligera que el agua de la taza. Como no hay corriente descendente (o es mucho más pequeña) los remolinos verticales no se ven arrastrados hacia el centro, y por eso no aumenta la velocidad angular alrededor del centro de la taza.

Puede hacerse una demostración análoga con la leche fría para ampliar remolinos en el aire. El movimiento de convección del aire puede alargar vórtices tubulares ya existentes, exactamente igual a como lo hace la corriente descendente de leche. El alargamiento incrementa la velocidad angular de los remolinos. En el aire, la convección necesaria puede ser hacia arriba (si la corriente es más ligera que el aire que la rodea) o hacia abajo (si la corriente es más pesada que el aire que la rodea). En cualquier caso, la convección puede intensificar los vórtices provocados por otros motivos; ejemplo de ello es el arremolinamiento (debido a un sobrecalentamiento del aire cerca del suelo) que puede dar lugar a torbellinos de polvo.



El flujo secundario en un té removido lleva las hojitas hacia el centro de la taza

Si se agita una taza de café o de té en cuyo fondo se puedan ver unas cuantas partículas, hojitas de té o partículas de azúcar sin disolver, se observará cómo dichas partículas quedan atraídas hacia el centro del fondo. El movimiento resulta un tanto paradójico. Se podría suponer que el material que está en el fondo de la taza debería ser lanzado hacia fuera en dirección a las paredes por la fuerza centrífuga creada por la rotación del fluido alrededor del eje central de la taza.

La fuerza centrífuga intenta empujar el material hacia las paredes. Consideremos una pequeña porción de agua girando alrededor del eje central. Mientras más alejada está dicha porción de agua del eje, mayor es la fuerza centrífuga que ella experimenta. En consecuencia, la presión en el líquido es mayor mientras más alejado esté del eje, con el fin de contrarrestar la fuerza centrífuga. Por tanto, el fluido en su giro no tiene desplazamiento radial sino únicamente desplazamiento angular alrededor del eje.

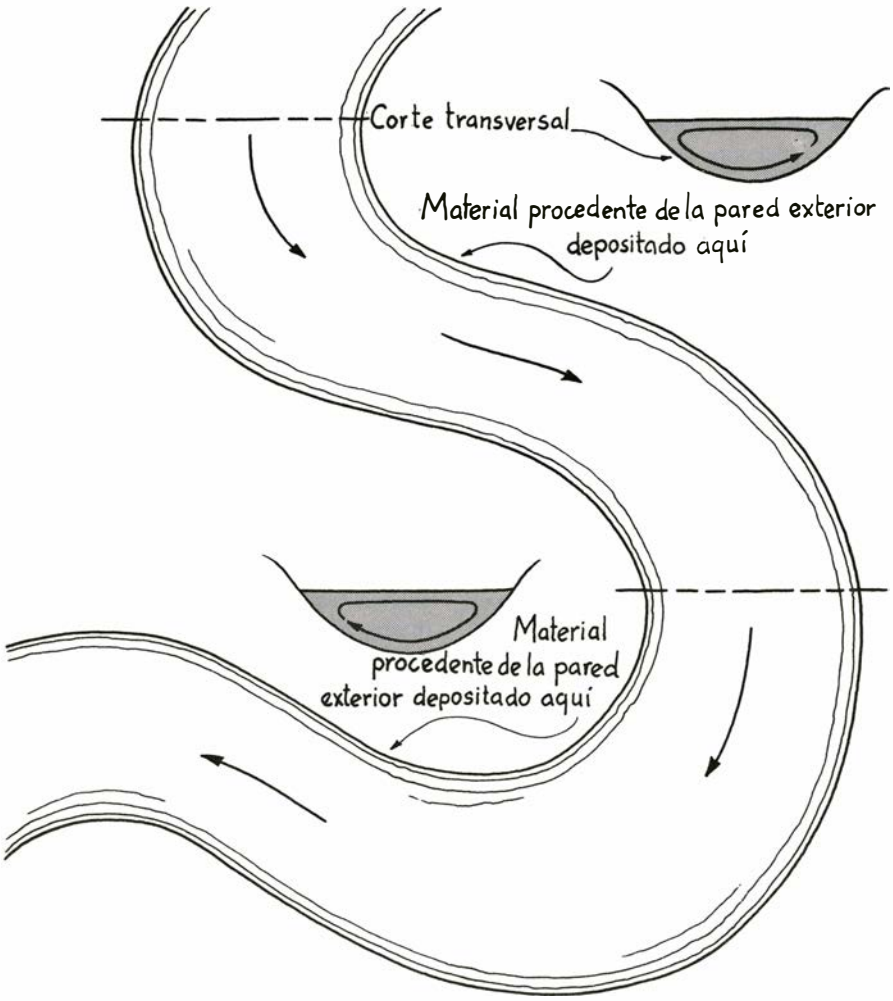
Sin embargo, se produce un movimiento radial debido al rozamiento entre la capa de fluido del fondo y la superficie del fondo de la taza. La reducción de la rotación en la capa del fondo provoca que la diferencia de presión existente entre el fluido que está cerca de la pared y el que está cerca del centro no sea tan grande como la que existe en la capa de arriba. La reducción de presión al girar provoca que la presión cerca de la pared sea mayor en la capa de la superficie que en la capa del fondo. Como consecuencia, el fluido se ve forzado hacia abajo (a lo largo de la pared) y radialmente hacia el interior en dirección al centro de la taza, en el fondo; hacia arriba (a lo largo del eje central) y radialmente hacia fuera, en la capa de la superficie superior. Este movimiento del fluido, conocido como corriente secundaria, puede arrastrar las hojitas de té u otros objetos que estén sumergidos por el fondo de la taza y depositarlos en el centro, al iniciar el fluido su ascensión por dicho centro.

Se puede observar el movimiento de la corriente secundaria haciendo gotear con cuidado un material colorante dentro del agua que se está agitando, en una taza o recipiente transparente. Aunque la corriente del fluido no será tan perfecta como se indica en la figura de esta página, el agua coloreada hará un movimien-

to en espiral alrededor del centro de la taza con otro radial aproximadamente igual al movimiento dibujado.

El mismo tipo de corriente secundaria es responsable en parte de los meandros de los ríos. Similar serpenteo puede verse también en la Corriente del Golfo y en las corrientes de otros océanos, así como en los canales de agua que se forman en la superficie de un glaciar. Aun cuando encontremos una parte de trayecto recta en una corriente, la inspección detenida de la misma nos mostrará que el movimiento del agua no es recto en la realidad, sino que ocurre un serpenteo de un lado a otro entre las paredes de la corriente. Las pequeñas perturbaciones introducidas en el curso de dicha corriente por el terreno que atraviesa inician la formación de los meandros. El misterio radica en la regularidad de las curvas resultantes.

Cuando el agua dobla un recodo, se forma una corriente secundaria similar a la de la taza de té. Debido al retardo de la corriente cerca del fondo, la diferencia de presión entre la parte interior y la parte exterior del recodo es diferente según se trate de una capa de líquido situada en la superficie de la corriente o en el fondo. La mayor presión de la parte exterior de la capa de arriba fuerza al fluido a bajar por la pared exterior. Al ir hacia el fondo, el fluido es impulsado en dirección a la parte interior de la curva, sube luego hacia arriba y, finalmente, sale de nuevo hacia la parte exterior de la curva a lo largo de la capa superficial. Durante ese tiempo, la velocidad horizontal del agua es mayor en la parte exterior de la curva que en la parte interior de la misma. La corriente más rápida arranca troncos de material de la margen exterior; dicho material se ve arrastrado por la corriente secundaria hasta la margen interior. El resultado es un agrandamiento de la curva del cauce, ya que la margen exterior se erosiona y se rellena la margen interior. Si tomamos una corriente que inicialmente empieza recta, la corriente secundaria agrandará cualquier perturbación que haya en su lecho para hacer un pequeño meandro, el cual se irá agrandando hasta convertirse en otro mucho mayor. Si el desarrollo de la curva aumenta notablemente, la propia corriente puede erosionar un nuevo cauce a través de la curva dejando al ensanche aislado al margen.



Efecto del flujo secundario al potenciar la formación de un meandro

Vicent J. Schaefer ha descrito, en *American Scientist,* un sorprendente dibujo geométrico producido sobre la superficie de su café del desayuno. Poniendo la taza de café caliente llena hasta el borde, de manera que la luz brillante del sol la cruce casi horizontalmente, la superficie muestra una zona poligonal como si estuviera llena de polvo, delimitada por trazos negros. Este tipo de dibujos geométricos superficiales fue analizado con detalle por vez primera por Henri Bénard en 1901. Ejemplos como estos dibujos pueden encontrarse en otras evaporaciones de fluidos y sistemas circulantes en la atmósfera y en el mar.

Los dibujos observados en la taza de café se deben a la recirculación del agua caliente que sube del fondo hasta la superficie, se enfría y entonces vuelve a bajar al fondo.

Sobre las zonas en las que el agua caliente asciende, se condensan pequeñas gotas de agua, sostenidas por la presión del vapor existente en la superficie del líquido. Las gotas son de un tamaño bastante uniforme, porque la presión del vapor no puede soportar gotas mayores y si fueran más pequeñas caerían rápidamente. En las zonas donde desciende el agua más fría no existen tales gotas suspendidas y la superficie aparece clara. Al ser oscuro el café, estas zonas aparecen también oscuras. En la superficie pueden observarse pequeñas zonas de gotas (sobre agua ascendente) que están delineadas por unos trazos oscuros relativamente finos donde el líquido desciende.

Si se examinan al microscopio las zonas más ligeras, veremos que están formadas por capas de gotas muy apretadas entre sí. La densidad de las gotas depende de la presión del vapor que tenga el líquido y del número de núcleos de condensación en el aire. Una atmósfera sucia proporcionará –en principio– más núcleos de condensación que darán lugar a la formación de más gotitas.

Para observar este fenómeno, no se necesita esperar una puesta o salida del sol. Se pueden contemplar más fácilmente los dibujos de recirculación de Bénard dirigiendo la luz de un proyector de diapositivas o de cine sobre la superficie de una taza de café. Si no se quiere gastar café, puede sustituirse por agua caliente teñida con un colorante oscuro (colorante doméstico oscuro o una tinta oscura). Para mantener el calor en el agua puede ponerse la taza (o aún mejor, un recipiente de Pyrex) en una placa caliente a baja temperatura. Para empezar, yo puse

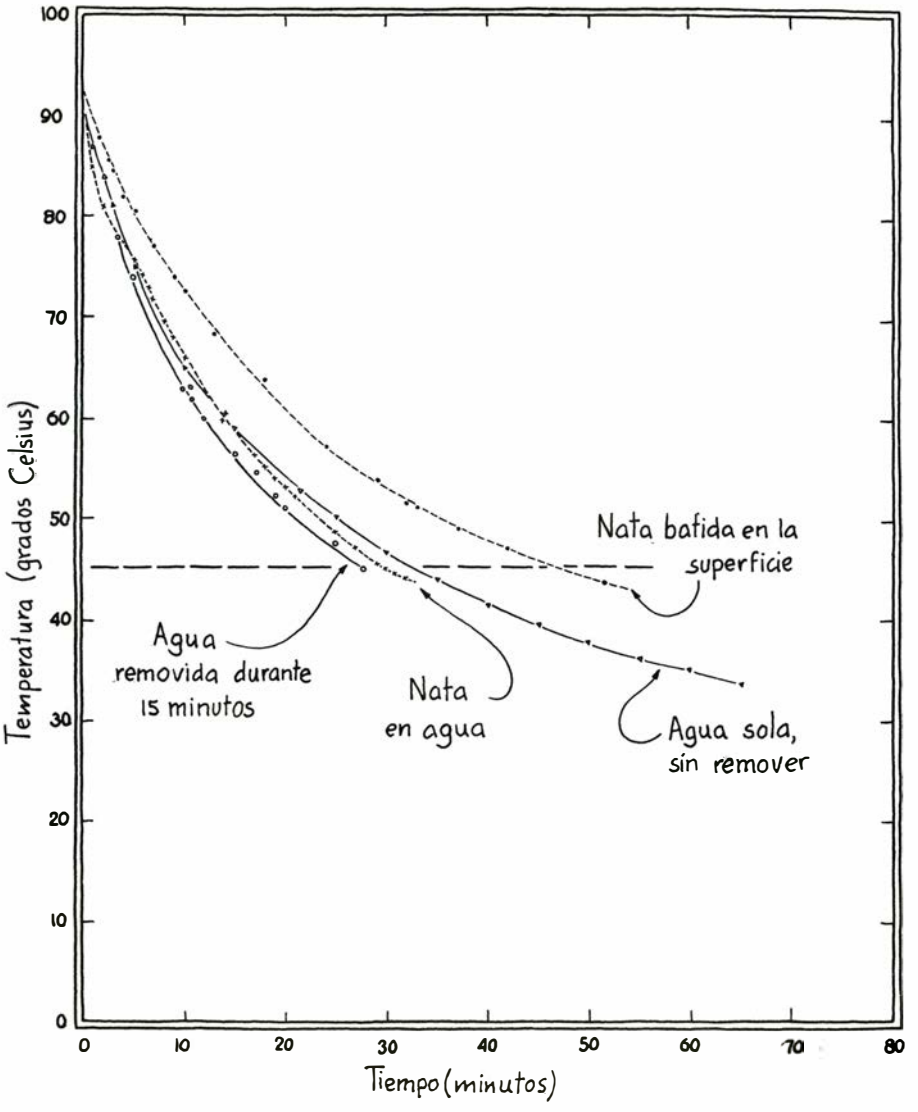
el agua a una temperatura próxima al punto de ebullición para desgasificarla (las burbujas son un estorbo) y después dejé que el agua se fuera enfriando. Las mejores "celdillas" Bénard aparecieron al cabo de varios minutos.

Si se forma una película de suciedad en la superficie, la recojo con una toalla de papel. Si el lector quiere observar el efecto de la contaminación originada por dicha película, puede poner una gota de aceite vegetal en la superficie. Este se extiende lentamente sobre la misma y elimina las "celdillas" Bénard.

Schaefer describió también el efecto causado por la colocación de objetos cargados eléctricamente cerca de zonas de luz en las "celdillas" Bénard. Si hacemos pasar un peine de plástico fuerte por el cabello o a lo largo de unos hilos de lana o de plástico, éste se carga transfiriendo electrones bien al peine o al otro material. Con unos tipos de material, el peine gana electrones y se carga negativamente; con otros, el peine pierde electrones y se carga positivamente. En cualquier caso, el peine cargado destruye las zonas de luz, lo que indica que las gotas ya llevaban una carga.

Cuando Schaefer sostenía un peine de plástico duro cargado cerca de la superficie del agua, vio algunas veces gotas que se formaban cerca de los dientes del peine. Yo he observado ese fenómeno al sostener un cable conductor de un generador electrostático cerca de la superficie, con el otro conductor del generador pegado a un recipiente de metal que contenía agua. En ambos casos, los iones creados en el aire cerca de la punta del objeto cargado son núcleos de condensación para la formación de las gotas. Con una fuente radiactiva ocurre lo mismo porque también produce iones en el aire, exactamente por encima de la superficie del agua. Una cerilla encendida, o cualquier otra fuente de pequeñas partículas, incrementaría de manera similar la formación de gotas.

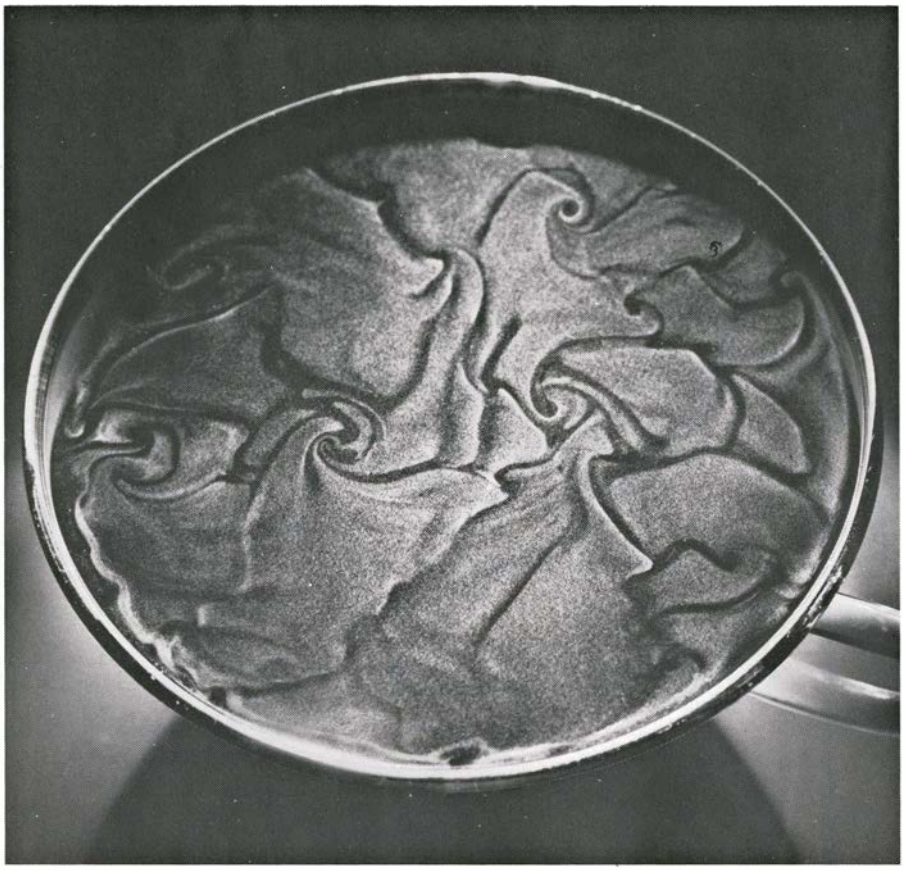
Cuando las gotas están iluminadas por luz blanca fuerte, muestran rápidamente colores cambiantes, delicados e iridescentes. La dispersión de luz que da origen a estos colores se reconoce por dispersión de orden superior de Tyndall, en honor de John Tyndall quien empezó a investigar sobre la misma en 1869. La dispersión de Tyndall puede observarse también en otros fenómenos naturales. La corona que se ve a veces alrededor del sol, que puede mostrar varios espectros completos de colores, resulta de la dispersión de Tyndall de pequeñas gotas en las finas nubes que se interponen entre la persona que mira el sol y éste (no nos referimos aquí a la corona que puede contemplarse durante el eclipse). El mismo origen tiene la corona que se observa alrededor de la luna. La dispersión causa también los delicados colores que aparecen en las nubes de color madreperla o nacaradas que se contemplan a veces después de la puesta del sol en las altas latitudes. Los modelos matemáticos de esta dispersión son complejos, porque el tamaño de las gotas se aproxima a las longitudes de onda de la luz visible. Las gotas miden aproximadamente una micra de diámetro y, por tanto, están situadas entre gotas mayores que pueden producir arcos iris (dispersión geométrica) y las partículas más pequeñas que dan origen al color azul del cielo (dispersión de Rayleigh).



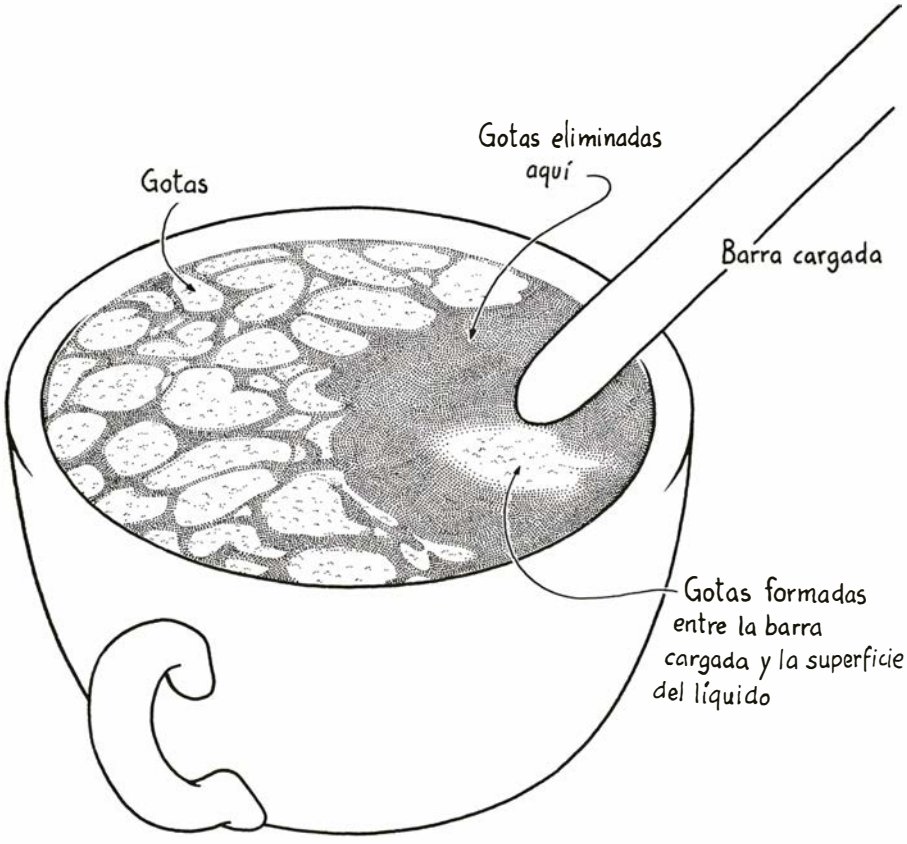
Velocidad de enfriamiento del agua caliente

Además de los cambios constantes en la superficie de la taza de café o cualquier otro recipiente, el lector encontrará también líneas oscuras que atraviesan rápidamente las zonas que parecen tener polvo. Schaefer afirma que estas líneas se deben a pequeños remolinos que se desarrollan justo sobre la superficie y duran sólo una fracción de segundo. La capa de aire que está inmediatamente encima del líquido es inestable porque está más caliente que el aire situado ligeramente más arriba. El lector puede crear su propio vórtice sujetando una ficha bibliográfica en sentido vertical con un borde cerca de la superficie. Cualquier pequeña corriente de aire que sople más allá del borde provoca un vórtice que se desliza a lo largo de la superficie. Incluso sin el borde, se desarrollan a veces remolinos mayores sobre la superficie, que llegan a durar unos 10 segundos mientras transportan rápidamente el vapor y las gotitas del entorno.

¿A qué velocidad se enfría una taza de café o de té? Para hacer retroceder las fronteras de la física moderna (por lo menos un milímetro o dos) medí la velocidad a la cual el agua se enfriaba de la temperatura a la que se había calentado



Dibujos geométricos sobre la superficie de un café caliente



Efecto causado por la colocación de una barra cargada cerca de la superficie

para preparar un café instantáneo. Quería saber cuál de los distintos procedimientos haría que el agua se enfriara más rápidamente. Herví agua en una tetera eléctrica y eché 200 mililitros en un recipiente de Pyrex con capacidad para 250 mililitros, el cual dejé sobre una placa de metal. Medí la temperatura del agua con un termómetro (con escala de 0 a 100 grados Celsius); lo introduje en el recipiente con el depósito de mercurio apoyado en una esquina del fondo del recipiente. La temperatura inicial en todas las pruebas fue 93 grados Celsius. Saqué mediciones de la temperatura hasta que el agua estaba por debajo de 45 grados, temperatura que creía adecuada para que una taza de café no resultara desagradablemente fría.

El agua sin aditivos y sin moverla se enfriaba suavemente, alcanzando 45 grados en 33 minutos, aproximadamente. Poniendo la medida equivalente a una cucharadita de café instantáneo en el recipiente antes de echar el agua, ésta seguía el mismo ritmo de enfriamiento durante los primeros 15 minutos, pero después se iba enfriando más rápidamente de lo que lo había hecho en el primer ensayo. Los resultados fueron casi idénticos cuando se pusieron tres terrones de azúcar en el recipiente y cuando se dejó una cuchara de metal en el mismo (sin añadir nada más). Se podría pensar que la inclusión de café instantáneo en polvo enfriaría el agua más rápidamente por dos razones: al estar el polvo a temperatura ambiente, absorbe calor del agua y obscurece también la disolución, incrementando por tanto la radiación térmica de alguna manera. El último efecto debe ser despreciado, dado que la adición de azúcar al agua no obscureció la solución, pero causó efectos similares. De la cuchara se puede esperar que incremente la velocidad de enfriamiento del agua porque inicialmente absorbe parte del calor del agua y después actúa como un radiador de calor en una habitación.

En otra prueba añadí 20 mililitros de nata líquida a una temperatura inicial de 10 grados Celsius, inmediatamente después de haber echado el agua. Revolví el agua sólo tres veces para mezclar la crema sin enfriarse por causa de la remoción. La temperatura descendió inmediatamente unos 4 grados, pero después de cinco minutos la mezcla de nata y agua empezó a seguir la misma curva de enfriamiento que había seguido el agua sola; sin embargo, después de 15 minutos, la mezcla de nata se empezó a enfriar más rápidamente.

La adición de alcohol podría incrementar la velocidad de enfriamiento de-

bido a la rápida evaporación de la superficie. Después de haber añadido 20 mililitros de vodka de 80 grados, a temperatura ambiente, la velocidad de enfriamiento era casi la misma que cuando añadí nata.

De todos los aditivos, el más eficaz para la alteración de la curva de enfriamiento del agua fue la nata Reddi (una nata batida que se presenta enlatada a presión) la cual eché en la superficie del agua, como se hace con el café irlandés. La crema estaba fría y pudo haber hecho descender inicialmente la temperatura de la superficie del agua, pero su efecto principal fue el de retener el calor en el agua y eliminar la evaporación. Ello comportó que el agua tardase 14 minutos más en alcanzar los 45 grados Celsius.

Me imaginé que, moviendo el agua tal cual, incrementaría mucho la velocidad de enfriamiento. Sin embargo, el efecto de agitar con fuerza el agua mediante el termómetro durante los 15 primeros minutos, redujo la temperatura del agua en 2 grados solamente. Al parecer, la remoción que yo realizaba no era mucho mejor que la convección normal de las moléculas en el agua al transportar agua caliente desde el centro a la superficie.

En mi último ensayo cubrí de negro las paredes exteriores del recipiente. Con una superficie negra, las paredes deberían radiar calor mejor, haciendo que el líquido se enfriara más de prisa. El agua se enfrió antes, repitiendo casi la curva de enfriamiento obtenida al removerla.

De todos estos datos se desprenden dos conclusiones. Primero, si se quiere enfriar el café rápidamente, pero sin añadirle mucha nata ni mucho azúcar, lo más indicado es ponerlo en una taza negra y removerlo bien con una cuchara de metal. No obstante, el enfriamiento resultante apenas merece tal esfuerzo, ya que sólo rebaja dos grados. Segundo, si se desea mantener el café lo más caliente posible, lo mejor que puede hacerse es servir un café irlandés y relajarse.

Si se estuviera interesado en seguir trabajando sobre este problema podrían considerarse los efectos resultantes de añadir nata, azúcar o un sucedáneo de nata en polvo, a los cinco o diez minutos de haber echado el agua. ¿Desciende la temperatura del café si se permite que éste se enfríe por evaporación y convección antes de añadir la nata, el sucedáneo en polvo o el azúcar? Puede que le guste descubrir la dependencia que existe entre el enfriamiento del café y la graduación de alcohol del whisky en un café irlandés. La investigación sobre este asunto podría ser muy atractiva si el experimento se lleva a cabo entre dos.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA BUSQUEDA DE VIDA EN MARTE

SPECIAL VIKING ISSUE. *Science,* vol. 193, n.º 4255; 27 de agosto de 1976.

SPECIAL VIKING ISSUE. *Science,* vol. 194, n.º 4260; 1 de octubre de 1976.

SPECIAL VIKING ISSUE. *Science,* vol. 194, n.º 4271; 17 de diciembre de 1976.

SPECIAL VIKING ISSUE. *Journal of Geophysical Research,* vol. 82, n.º 28; 30 de septiembre de 1977.

RIEGO GOTA A GOTA

DRIP IRRIGATION: PRINCIPLES, DESIGN, AND AGRICULTURAL PRACTICES. Dan Goldberg, Baruch Gornat y Daniel Rimon. Drip Irrigation Scientific Publications, Israel, 1976.

WELD CONTROL UNDER DRIP IRRIGATION IN ORCHARD AND VINEYARD CROPS. A. Lange, H. Kempen, B. Fisher, F. Aljibury y J. Schlesselman en *Proceedings of the 2nd International Drip Irrigation Congress, San Diego, California,* págs. 422-424.

EL AGRUPAMIENTO DE LAS GALAXIAS

NEW REDUCTION OF THE LICK CATALOG OF GALAXIES. Michael Seldner, B. Siebers, Edward J. Groth y P. James E. Peebles en *The Astronomical Journal,* vol. 82, n.º 4, págs. 249-256; abril, 1977.

STATISTICAL ANALYSIS OF CATALOGS OF EXTRAGALACTIC OBJECTS, VII: TWO- AND THREE-POINT CORRELATION FUNCTIONS FOR THE HIGH RESOLUTION SHANE-WIRTANEN CATALOG OF GALAXIES. Edward J. Groth y P. James E. Peebles en *The Astrophysical Journal,* vol. 217, parte 1.ª, págs. 385-405; 15 de octubre de 1977.

GATOS Y VIAS COMERCIALES

COMPARATIVE GENETICS OF COAT COLOUR IN MAMMALS. Anthony G. Searle. Academic Press, Inc., 1968.

MELANIN, ADRENALIN AND THE LEGACY OF FEAR. Clyde Keeler, Theodore Mellinger, Edward Fromm y Lenore Wade en *The Journal of Heredity,* vol. 61, n.º 2, págs. 81-88; marzo-abril, 1970.

THE EFFECTS OF SELECTION AND HUMAN PREFERENCE ON COAT COLOUR GENE FREQUENCIES IN URBAN CATS. J. M. Clark en *Heredity,* vol. 35, parte 2.ª, págs. 195-210; octubre, 1975.

GENETICS FOR CAT BREEDERS. R. Robinson. Pergamon Press, 1977.

LOS USOS DE LOS INSTRUMENTOS DE SILEX DEL PALEOLITICO

PREHISTORIC TECHNOLOGY: AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE OLDEST TOOLS AND ARTEFACTS FROM TRACES OF MANUFACTURE AND WEAR. S. A. Semenov, traducción e introducción de M. W. Thompson. Barnes & Noble, Inc., 1964.

MICROWEAR ANALYSIS OF EXPERIMENTAL FLINT TOOLS: A TEST CASE. Lawrence H. Keeley y Mark H. Newcomer en *Journal of Archaeological Science,* vol. 4, n.º 1, págs. 29-62; marzo, 1977.

EL PROCESO DE LA FECUNDACION

ACTIVATION OF SEA-URCHIN EGGS BY A CALCIUM IONOPHORE. Richard A. Steinhardt y David Epel en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 71, n.º 5. págs. 1915-1919; mayo, 1974.

THE ISOLATION OF INTACT CORTICAL GRANULES FROM SEA URCHIN EGGS: CALCIUM IONS TRIGGER GRANULE DISCHARGE. Victor D. Vacquier, en *Developmental Biology,* vol. 43, págs. 62-74; 1975.

THE SURFACE EVENTS AT FERTILIZATION: THE MOVEMENTS OF THE SPERMATOZOON THROUGH THE SEA URCHIN EGG SURFACE AND THE ROLES OF THE SURFACE LAYERS. Gerald P. Schatten y Daniel Mazia en *Journal of Supramolecular Structure,* vol. 5, n.º 3, págs. 343-369; 1976.

INTRACELLULAR *p*H AND ACTIVATION OF SEA URCHIN EGGS AFTER FERTILIZATION. James D. Johnson, David Epel y Miles R., Paul en *Nature,* vol. 262, n.º 5570. págs. 661-664; agosto 19, 1976.

CONSECUENCIAS DE UNA ANTERIOR CRISIS ENERGETICA

NOTE ON THE PROGRESS OF IRON PRODUCTION IN ENGLAND, 1540-1640. John U. Nef en *The Journal of Political Economy,* vol. 44, n.º 3, págs. 398-403; junio, 1936.

SILVER PRODUCTION IN CENTRAL EUROPE, 1450-1618. John U. Nef en *The Journal of Political Economy,* vol. 49, n.º 4, págs. 575-591; agosto, 1941.

THE AGRICULTURAL REVOLUTION. Eric Kerridge. Allen & Unwin Ltd, 1967.

WAR AND HUMAN PROGRESS: AN ESSAY ON THE RISE OF INDUSTRIAL CIVILIZATION, John U. Nef. W. W. Norton & Co., 1968.

LA ESTRUCTURA DE LOS CONCEPTOS CIENTIFICOS

FUNDAMENTALS OF CONCEPT FORMATION IN EMPIRICAL SCIENCE. Carl G. Hempel. Chicago University Press. Chicago, 1952.

THEORIE UND ERFAHRUNG. Wolfgang Stegmüller. Springer-Verlag. Heidelberg, 1970.

THEORY OF MEASUREMENT. J. Pfanzagl. Physica-Verlag. Würzburg-Wien, 1971.

FOUNDATIONS OF MEASUREMENT. D. H. Krantz, R. D. Luce, P. Suppes y A. Tversky. Academic Press. New York-London, 1971.

JUEGOS MATEMATICOS

ON EDGEWISE 2-COLORED GRAPHS WITH MONOCHROMATIC TRIANGLES AND CONTAINING NO COMPLETE HEXAGON. Ronald L. Graham en *Journal of Combinatorial Theory,* vol. 4, n.º 3, pág. 300; abril, 1968.

GRAPH THEORY. Frank Harary. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1969.

GENERALIZED RAMSEY THEORY FOR GRAPHS–A SURVEY. Stefan A. Burr en *Lecture Notes in Mathematics, Vol. 406, Graphs and Combinatories: Proceedings of the Capital Conference on Graph Theory and Combinatorics at the George Washington University, June 18-22, 1973,* págs. 52-75; 1974.

TALLER Y LABORATORIO

ON THE NOTE EMITTED FROM A MUG WHILE MIXING INSTANT COFFEE. W. E. Farrell, D. P. McKenzie y R. L. Parker in *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society,* vol. 65, Parte 1.ª, págs. 365-367; enero, 1969.

OBSERVATIONS OF AN EARLY MORNING CUP OF COFFEE. Vincent J. Schaefer en *American Scientist,* vol. 59, n.º 5, págs. 534-535; septiembre-octubre, 1971.

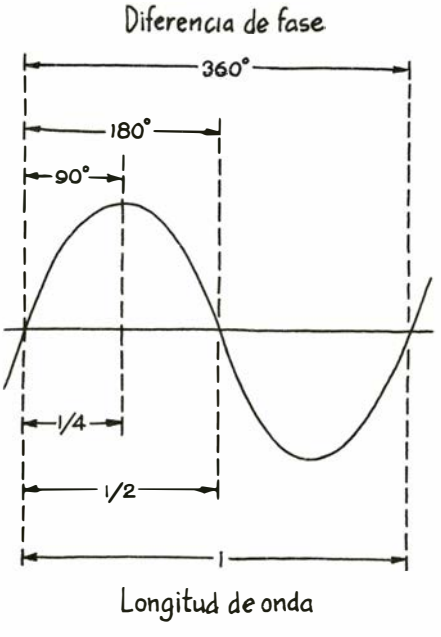
Taller y laboratorio

Estudio de la luz polarizada usando láminas de un cuarto y de media onda fabricadas por uno mismo

Jearl Walker

La luz que entra por sus ojos es una configuración ondulatoria de campos eléctricos y magnéticos que son perpendiculares a la dirección en que viaja la luz. La mayoría de las luces que usted ve no están polarizadas, es decir, los campos oscilan en todas las posibles direcciones perpendiculares a la dirección de la luz. Sin embargo, hay luces que están linealmente polarizadas, y así pues las oscilaciones de su campo eléctrico se producen a lo largo de un solo eje perpendicular a la dirección en que viajan. Por ejemplo, la luz que nos llega del sol no está polarizada mientras que la luz que refleja la superficie de una carretera puede estar polarizada (con su campo eléctrico oscilando principalmente en el plano horizontal).

Probablemente, el método moderno más conveniente para polarizar luz no polarizada procedente del sol o de cualquiera otra fuente luminosa sea con un filtro polarizador tipo Polaroid. Si una luz sin polarizar se hace pasar a través de dicho filtro, se convierte en luz linealmente polarizada. En otras palabras, del filtro emerge sólo la luz procedente de campos eléctricos que oscilen a lo largo de un eje único, perpendicular a la dirección del rayo de luz. Esta transmisión selectiva puede resultar provechosa. Si un automovilista quiere eliminar los reflejos del firme de la calzada, puede usar unas gafas de sol polarizadas, las cuales dejan pasar sólo la luz que procede de campos eléctricos que oscilan verticalmente y, por tanto, no deja pasar el destello producido por los rayos de luz procedente de campos eléctricos que oscilen con una mayor proporción en el plano horizontal.



Diferencias de fase

Los filtros polarizadores comunes están hechos estirando láminas de plástico de alcohol de polivinilo. Inicialmente, en las láminas las largas cadenas moleculares están orientadas al azar y no muestran preferencia alguna a polarizar una dirección u otra. Sin embargo, cuando las láminas se calientan y luego se estiran, las moléculas largas tienden a orientarse en dirección paralela a la del alargamiento. Al pasar una luz sin polarizar a través de una de estas láminas de moléculas orientadas, la parte de luz que proviene de las oscilaciones de un campo eléctrico que oscile a lo largo de un eje paralelo o coincidente con la orientación de las moléculas es absorbida por dichas cadenas moleculares. El campo eléctrico perpendicular a la longitud de las moléculas es el que no se absorbe. Por tanto, la luz que atraviesa la lámina es la provocada por un campo eléctrico que oscila a lo largo de un solo eje, es decir, luz linealmente polarizada. La lámina se llama dicroica debido a que su absorción es distinta según sea el sentido de polarización de la luz incidente. Dos filtros polarizadores, uno detrás de otro y orientados de igual manera, dejarán pasar la luz, mientras que si se orientan perpendicularmente uno respecto al otro, la bloquearán.

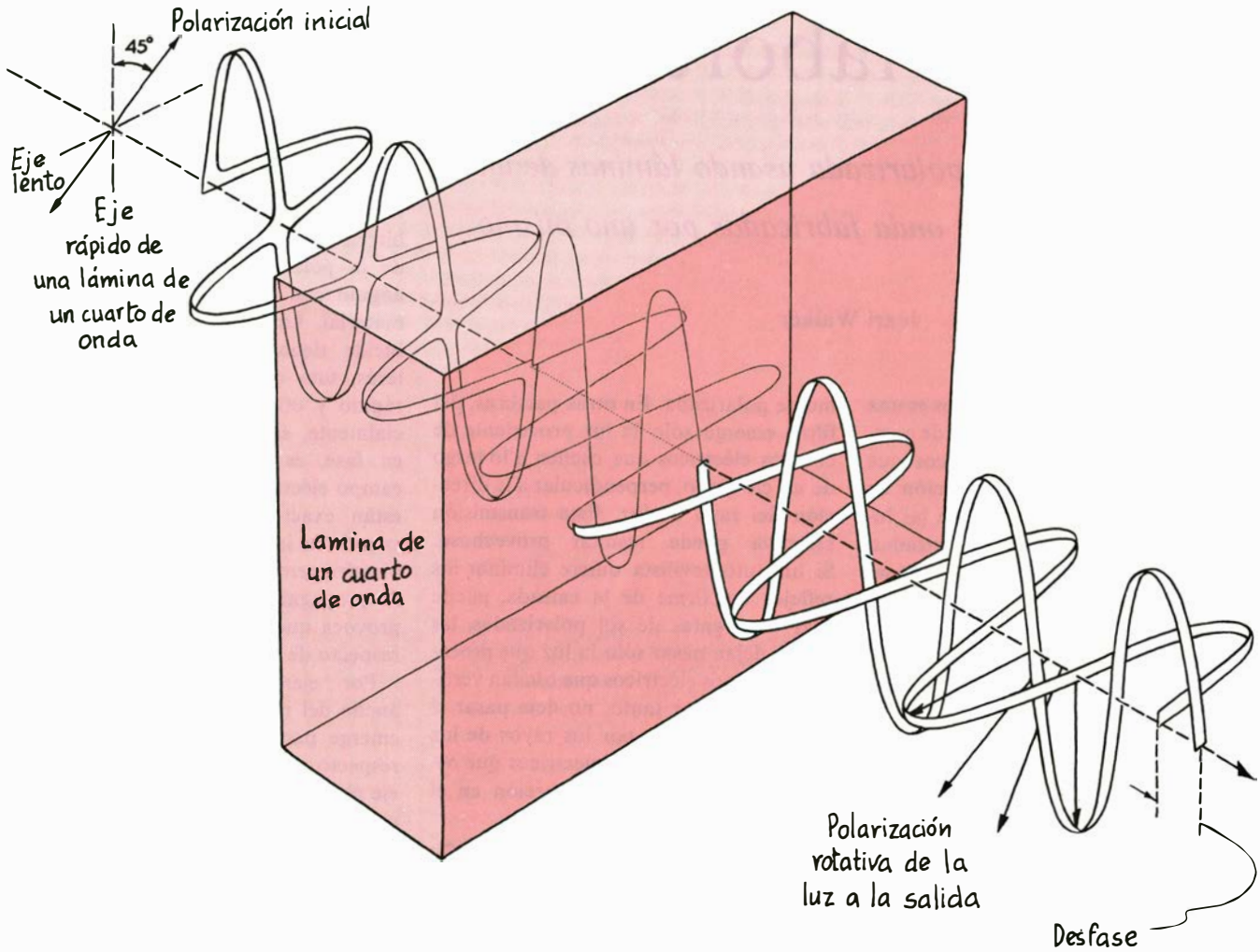
Otros materiales, como, por ejemplo, algunos cristales, refractan la luz en cualquier sentido de polarización, pero lo hacen con velocidad diferente. Tales materiales, llamados birrefringentes o doblemente refractantes, tienen dos ejes perpendiculares; la velocidad de la luz es mayor a lo largo de un eje que a lo largo del otro.

Supongamos que una luz linealmente polarizada incide sobre un material birrefringente de manera que el sentido de la polarización de la luz forme un ángulo con los ejes rápido y lento del material. La polarización de la luz que incide tiene dos componentes de interés, una componente paralela al eje rápido y otra paralela al eje lento. Inicialmente, estas dos componentes están en fase, es decir, las oscilaciones del campo eléctrico a lo largo de los dos ejes están exactamente acompasadas. Pero cuando la luz pasa a través del material birrefringente, la diferencia de velocidad de propagación de las dos componentes provoca que una componente se desfase respecto de la otra.

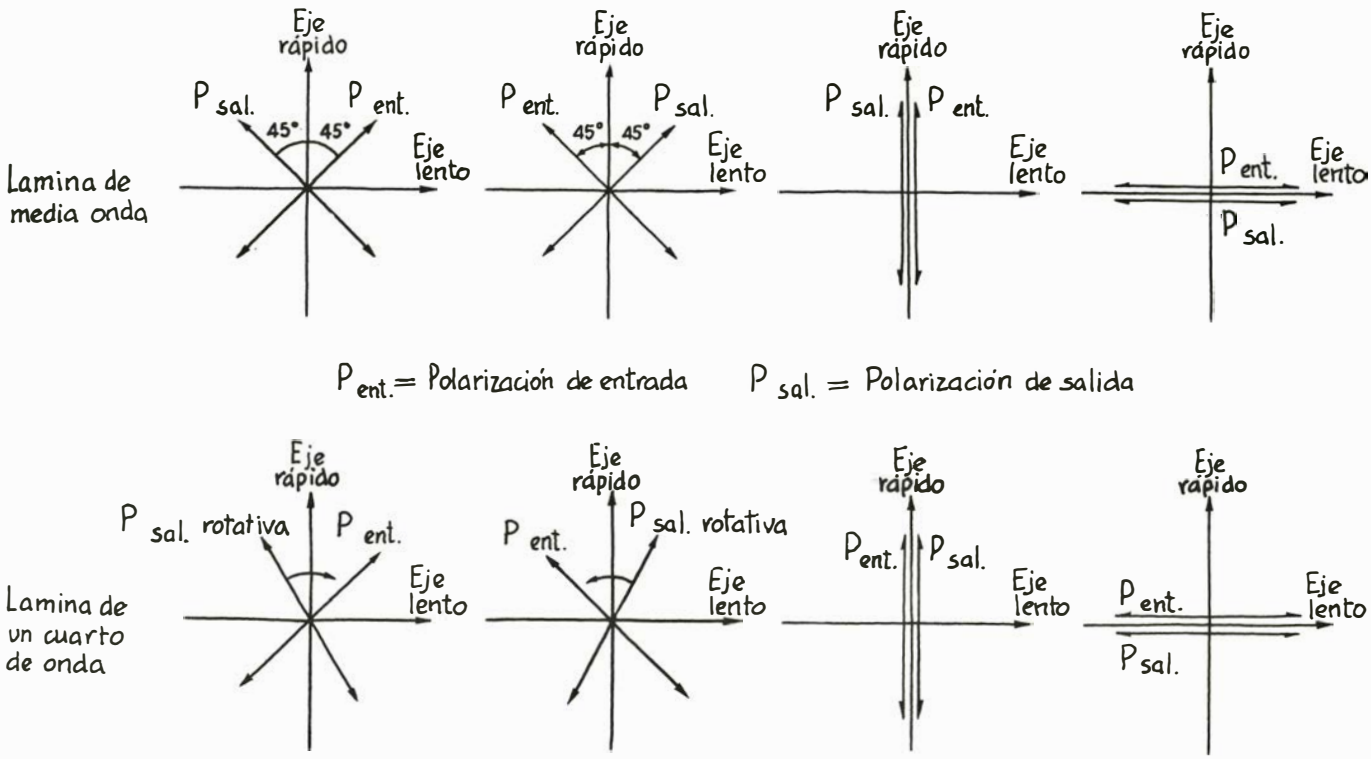
Por ejemplo, supongamos que el ancho del material es tal que la luz que emerge paralela al eje lento se retrasa respecto a la luz que emerge paralela al eje rápido un cuarto de longitud de onda, o bien 90 grados (dado que una longitud de onda se completa a lo largo de un ciclo de 360 grados). Entonces, la diferencia de fase entre las dos componentes de la salida se dice que es de un cuarto de longitud de onda, esto es, de 90 grados, ya que asume a las dos componentes de la luz que estaban en fase y las separa o aleja de la fase en 90 grados. La luz que emerge no está ya linealmente polarizada a causa de esta diferencia de fase.

La combinación de las dos componentes, que emergen con una diferencia de fase entre ellas de 90 grados, es una luz elípticamente polarizada en la cual el sentido de polarización (el eje a lo largo del cual oscila el campo eléctrico neto) gira constantemente alrededor del eje de propagación de la luz. El lector puede imaginarse qué ocurre si la punta de la flecha que representa el sentido de la polarización dibujara una elipse alrededor del eje de propagación. Si los dos componentes que emergen tienen la misma amplitud (si la máxima intensidad de campo eléctrico a lo largo del eje rápido es igual a la máxima intensidad de campo eléctrico a lo largo del eje lento), la punta dibuja un círculo y la luz que emerge es una luz circularmente polarizada. Se obtiene este resultado cuando el sentido de polarización de la luz incidente forma un ángulo de 45 grados con los ejes rápido y lento del material birrefringente.

El material también podría tener un



Desfase de la luz al pasar a través de una lámina de un cuarto de onda



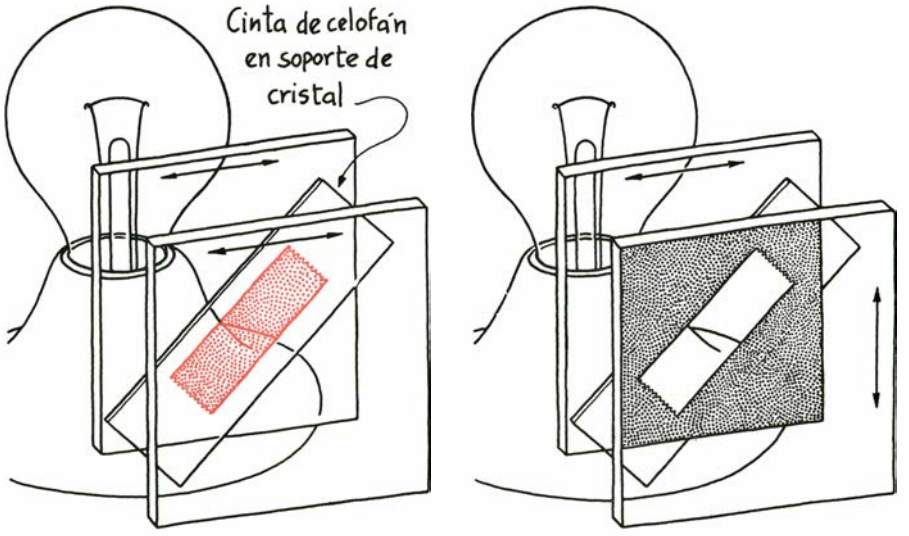
Diversas polarizaciones de la luz linealmente polarizada al pasar a través de láminas de un cuarto y de media onda

espesor tal que provocara que las componentes de la luz a la salida tuvieran un desfase de 180 grados una respecto de la otra, lo cual es una variación de media longitud de onda entre las dos. En este caso, el material se llamaría o bien lámina de media onda, o bien lámina retardadora en 180 grados. El campo eléctrico neto de las componentes que emergen oscilaría a lo largo de un solo eje y la luz estaría de nuevo linealmente polarizada. Pero ahora, el eje de polarización no sería el mismo que el de la luz incidente. El nuevo eje de polarización se movería en el espacio alrededor, o bien del eje lento, o del eje rápido.

Frank S. Crawford, Jr., de la Universidad de California en Berkeley, en su libro *Waves* (Ondas), describe varios experimentos que se pueden hacer con materiales birrefringentes comunes. También suministra información sobre cómo el lector puede hacer sus propias láminas de un cuarto y de media longitud de onda. Este mes nos ocuparemos de la fabricación de estos aparatos ópticos, investigando sus efectos sobre la luz polarizada, y del uso de las láminas para demostrar la birrefringencia de la córnea de los ojos. El mes que viene describiré cómo hay que emplear los aparatos para obtener luz circularmente polarizada.

Coloque un trozo de plástico transparente, de esos que envuelven los caramelos o las cajetillas de cigarrillos, entre dos filtros polarizadores cruzados, uno respecto a otro, de manera que impidan el paso de cualquier tipo de luz (los filtros pueden obtenerse en Edmund Scientific Company, 7778 Edscoy Building, Barrington, N.J. 08007 por 2,5 dólares el paquete de 20 unidades), o bien desmontando y sacando los cristales de un par de gafas de sol polarizadas. A continuación, busque una lámpara de incandescencia que tenga el cristal del bulbo claro y el filamento recto. Con el plástico situado en el sitio indicado, el sistema de filtros dejará pasar algo de luz, debido a que el plástico reorienta la polarización de la luz que sobre él incide y de este modo alimenta el segundo filtro polarizador con una componente de luz que está polarizada en el mismo sentido que el segundo filtro. Girando el plástico se consigue que la luz que deja pasar el sistema de filtro sea lo más intensa posible.

Un trozo de un plástico especial que se usa en ciertos envoltorios inicialmente no se comporta igual. Pero estirando dicho material el lector puede orientar sus moléculas largas igual que se orientaban en la fabricación de los filtros polarizadores; además, se puede provocar así la aparición de un eje rápido y otro lento en el material. Sitúe un trozo estirado de este plástico de envolver entre dos filtros polarizadores cruzados, de manera que la dirección del alargamiento del plástico forme 45 grados con el sentido de polarización de los filtros. Obtendrá entonces un poco de luz que pasará a través del sistema de filtros.



Una lámina de semionda hecha con una cinta de celofán

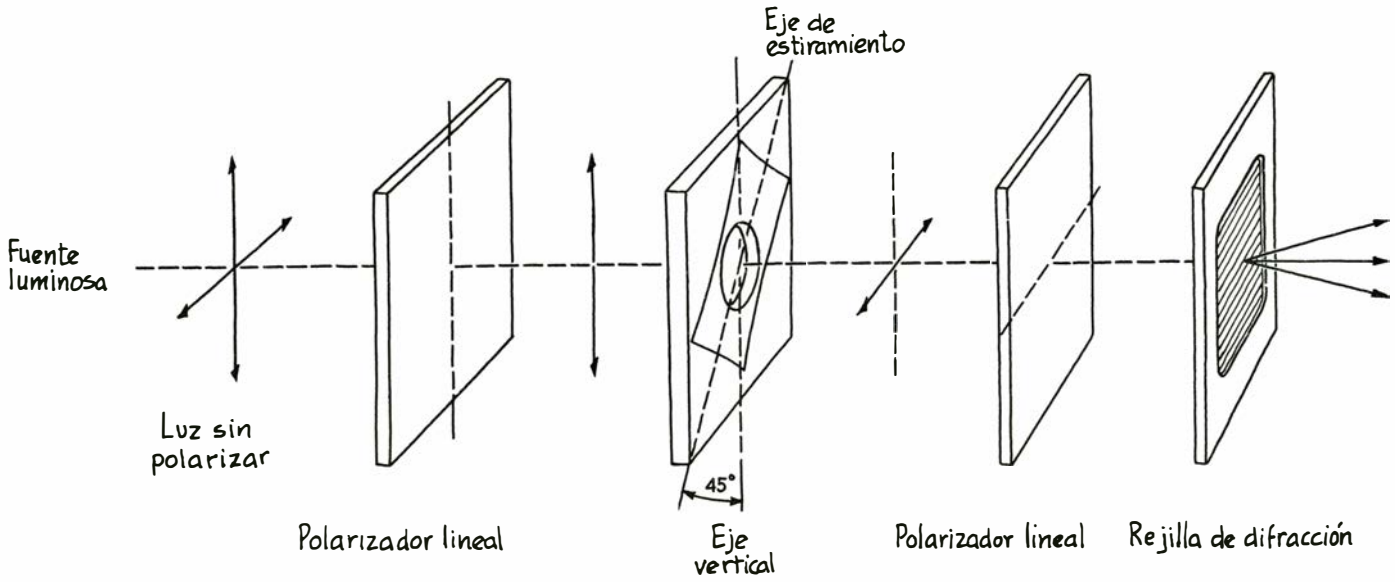
A partir de varias capas de plástico de envolver estirado, el lector puede fabricar sus propias láminas de un cuarto y de media onda de longitud. Sobre un orificio abierto en un trozo de madera, de cartulina o de metal consistente, coloque y fije de 10 a 14 capas del plástico estirado, de manera que coincidan las direcciones en que se han estirado. Fije al otro lado del orificio un filtro polarizador, de suerte que su sentido de polarización forme un ángulo de 45 grados con la dirección en que se ha estirado las capas. El filtro suministra luz linealmente polarizada a las capas, con sus componentes a lo largo del eje de estiramiento y de un eje perpendicular a él, iguales.

Con un número apropiado de capas de plástico fijas en su sitio, el conjunto actúa como una lámina de semionda para determinada longitud de onda contenida en la luz blanca incidente. Para tal longitud de onda, las dos componentes de la luz que emerge están desfasadas en 180 grados, es decir, en media longitud de onda. Se puede detectar este desfase colocando otro filtro polarizador en la trayectoria de la luz que emerge, comprobando su sentido de polarización.

Por ejemplo, supongamos que se han colocado suficientes capas como para tener una lámina de semionda respecto a una luz con una longitud de onda de 500 nanómetros, que es precisamente la luz verde. Entonces, el verde de la luz incidente experimenta un desfase de 180 grados entre las dos componentes de la luz a la salida. Las dos componentes que emergen sumadas dan un sentido de polarización neto que es lineal y perpendicular al sentido de polarización inicial. Si el segundo filtro polarizador se orienta de manera que deje pasar la luz, el lector verá una luz casi totalmente verde. Si el segundo filtro se orienta paralelo al sentido de polarización del primero, la luz verde queda bloqueada por el segundo filtro y el lector verá en su lugar el espectro visible, pero sin el verde.

Si para cualquier orientación del segundo filtro el lector ve colores (quizá confusamente) es que las capas de material de envolver no constituyen una lámina de media longitud de onda, de manera que los colores salen elípticamente polarizados. El lector puede afinar la lámina de semionda añadiendo o quitando capas de material de envolver, y probando luego con el color filtrado cuando el segundo filtro se sitúe perpendicular al primero. Si el lector divide por la mitad el número de capas, tendrá una lámina de un cuarto de onda.

El lector puede construir también una lámina de semionda con una sola capa, empleando una cinta de plástico transparente (no la cinta mágica transparente, que es sólo semitransparente). Pegue luego dicha cinta sobre un trozo de cristal (como soporte) y sitúela entre dos filtros polarizadores que tengan sus sentidos de polarización cruzados. Dejará pasar un determinado rango de colores: aquellos colores para los cuales, por su espesor, la cinta es aproximadamente una lámina de semionda. Mi cinta de celofán era, aproximadamente, una lámina de media longitud de onda para la mayoría de los colores del espectro visible, excepto para el azul del final. Con filtros cruzados, la luz que pasaba era blanca; con filtros paralelos, dicha luz fue azul.



Comprobación de los rangos de longitudes de onda que atraviesan una lámina de semionda

Con una lámina de media longitud de onda, hecha con plástico de envolver o con cinta de celofán, examine la luz que sale de una rejilla de difracción. Si el segundo filtro polarizador se orienta de manera que deje pasar la longitud de onda para la cual el montaje hecho es una lámina de media longitud de onda, el lector encontrará ese color en el espectro de la rejilla. Girando el segundo filtro hacia la orientación perpendicular bloqueará dicho color y lo eliminará del espectro visto en la rejilla.

Con varias capas de cinta transparente, el lector puede fabricar un filtro que deje pasar luz solamente en determinado y estrecho rango de longitudes de ondas. Haga un montoncito de 16 capas de cinta plástica clara, y póngalo encima de un trozo de cristal. Para mejorar la transmisión de la luz a través de las capas ponga una gotita de aceite lubricante entre cada capa y la siguiente, así como entre la primera capa y el cristal. Ahora coloque el montoncito con el cristal entre dos filtros polarizadores y oriéntelo igual a como orientó el cristal con una sola cinta.

Examine de nuevo la luz que emerge con la rejilla de difracción. El espectro transmitido tiene varias líneas oscuras entre imágenes de color del filamento de la lámpara, lo que indica que el segundo filtro de polarización está bloqueando varias longitudes de onda diferentes en la luz que emerge de las cepas. A medida que se va girando el segundo filtro, las líneas oscuras se ven reemplazadas por líneas brillantes, y viceversa. Cuando el segundo filtro se coloca en posición perpendicular a su primera orientación, deja pasar las longitudes de onda que anteriormente bloqueó y bloquea las que anteriormente dejó pasar. Para algunas longitudes de onda contenidas en la luz blanca incidente, el conjunto de capas pegadas constituyen efectivamente una lámina de semionda; las polarizaciones que emergen son lineales, pero girando o fluctuando alrededor del eje rápido o del eje lento. Para otras longitudes de onda, el conjunto de capas resultan ser realmente láminas de longitud de onda completa; su polarización se mantiene. (Un desfase correspondiente a un número entero de longitudes de onda hace solamente que las componentes de la luz a la salida –tanto las existentes a lo largo del eje rápido como las existentes a lo largo del eje lento– se retrasen en fase, de manera que tengan la misma polarización que la luz incidente.) Por tanto, una orientación del segundo filtro de polarización selecciona una de estas longitudes de onda para dejarlas pasar y otra orientación del filtro polarizador seleccionaría otra longitud de onda distinta. En cualquier caso, el espectro es incompleto; sólo se permite el paso a ciertas longitudes de onda.

Una sola capa de cinta adhesiva proporciona un desfase de aproximadamente la mitad de una longitud de onda para el espectro visible. Para conseguir un cambio de una longitud de onda completa de algunos colores, el lector necesita una capa de cinta más gruesa. Se puede hacer con cuatro capas, pero las líneas oscuras son más visibles con 16 capas. Para ver este efecto, haga dos grupos con la cinta adhesiva, en uno ponga cuatro capas y en el otro ocho. Para una orientación particular del segundo filtro de polarización, el grupo de 16 capas deja pasar la luz dentro de un estrecho rango de longitudes de onda. El montón más pequeño deja pasar también la luz sólo entre ciertos rangos de longitudes de onda, pero la gama se hace más ancha a medida que el montón de cinta adhesiva va reduciendo su tamaño.

Si la luz blanca pasa a través de los tres grupos, sólo sobrevive la luz de cierto rango más estrecho de longitudes de onda. Si se pusieran más grupos en el rayo de luz, con cada nuevo grupo que tuviera el doble de grosor que el anterior, las series de longitudes de onda supervivientes serían cada vez menores y desaparecerían hasta que quedaran unas dos en el espectro visible. Después, un último filtro de color podría seleccionar una de ellas.

Este tipo de filtro fue desarrollado por el astrónomo francés B. F. Lyot, en 1932, para fotografiar el sol. La anchura de la banda (anchura del rango de la longitud de onda transmitida por el filtro) era pequeña, de 0,1 nanómetros, en los filtros de Lyot, los cuales estaban hechos de cuarzo. Con los filtros de Lyot, ajustados para pasar la longitud de onda de la emisión de hidrógeno y para bloquear todas las demás longitudes de onda visibles, podría fotografiarse el sol en su emisión de hidrógeno; así se conseguiría mostrar el comportamiento del hidrógeno en el sol.

Casi todo el mundo puede detectar, con sus propios ojos, luz polarizada sin ayuda externa. Mire a través de un filtro que polarice linealmente hacia una parte azul del cielo o a cualquier otro fondo azul continuo. En el centro de su campo de visión, aparecerá una pequeña y débil figura con aspecto de reloj de arena amarillo subtendiendo un ángulo de unos 3 grados. Pueden verse también pequeñas zonas azules a los lados del reloj de are-

na (pero no son visibles para todo el mundo).

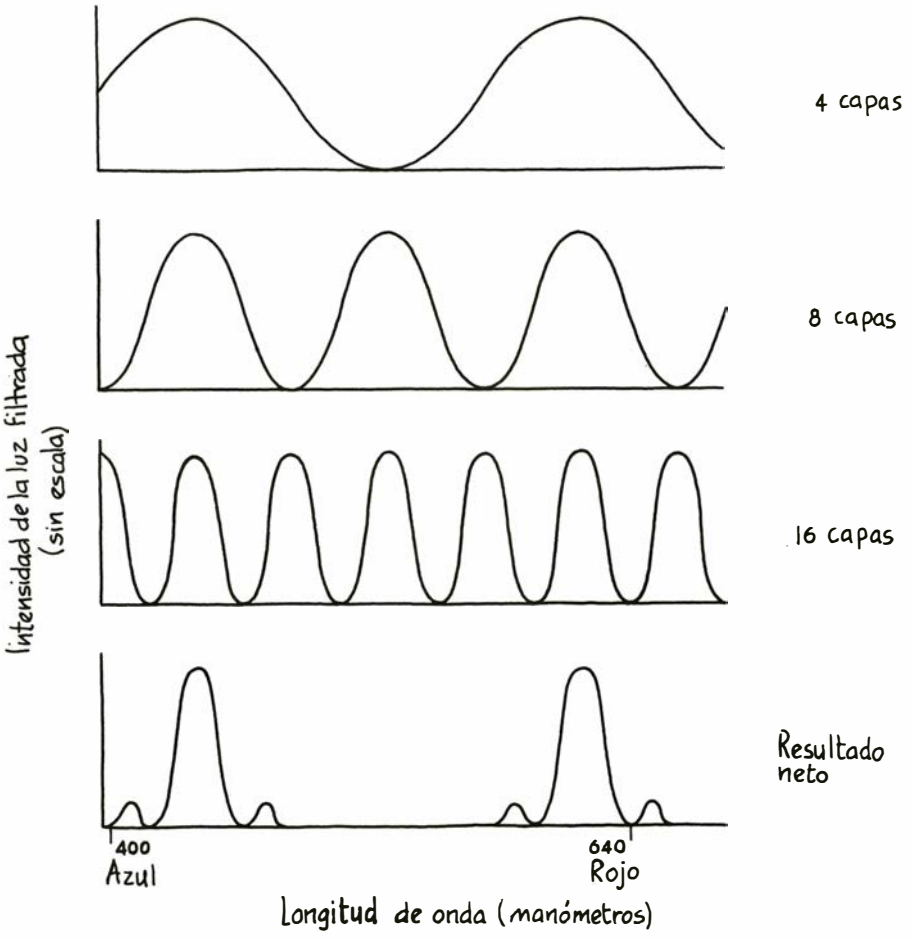
El experimento de reloj de arena se ha denominado de los cepillos de Haidinger, en honor del minerálogo austríaco Wilhelm Karl von Haidinger, quien descubrió este efecto en 1844. La figura desaparece rápidamente, a no ser que el sentido de polarización de la luz incidente en sus ojos cambie, de suerte que el lector debe girar el filtro de polarización lentamente para que la figura se mantenga visible. El reloj de arena gira en el mismo sentido.

Si el lector no puede ver el reloj de arena ahora, puede que sea capaz de verlo en el futuro. Hace algunos años yo podía ver la figura en la luz polarizada del cielo sin usar ningún filtro polarizador. Ahora necesito el filtro porque la polarización del cielo no es, aparentemente, suficiente para producir el reloj de arena en mi ojo.

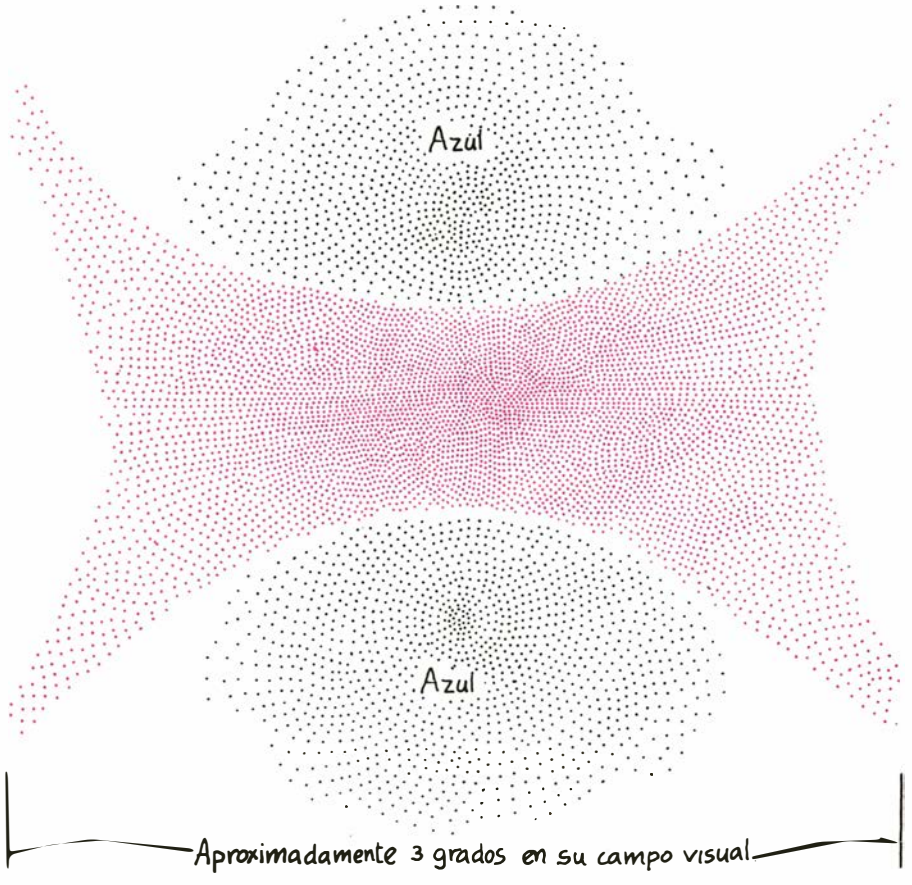
Aunque los cepillos de Haidinger han sido discutidos durante mucho tiempo, todavía no se ha dado una explicación completa de los mismos. Se deben, probablemente, a la absorción selectiva de la luz por el pigmento de la mácula lútea, que es el punto de visión más clara que el centro de la retina. El pigmento absorbe el extremo azul del espectro visible, a longitudes de onda desde 430 a 490 nanómetros, pero la absorción depende del sentido de polarización de la luz incidente.

Para esquematizar las características de la absorción, se dibujan elementos de pigmento colocados en líneas radiales a partir de un centro. La máxima absorción se realiza a lo largo de un diámetro, siguiendo la pauta de que éste sea perpendicular al sentido de polarización de la luz incidente en la mácula lútea. Por ejemplo, supongamos que el lector sujeta el filtro polarizador de tal manera que la luz entra en el ojo polarizada verticalmente. Entonces, la máxima absorción del azul de la luz incidente tiene lugar a lo largo de un diámetro horizontal. Si se gira el filtro, la máxima absorción se realiza a lo largo de otros diámetros, siempre perpendiculares a cualquier sentido de polarización que el experimentador dé a la luz que entre por su ojo. Como hemos visto, el material que absorbe diferentes cantidades de luz a lo largo de diferentes ejes se le define como dicroico. Se dice que el pigmento en la mácula lútea del ojo es radialmente dicroico debido a esta dependencia con la polarización incidente.

Para hacerlo más simple, consideremos que la luz incidente esté verticalmente polarizada. La eliminación del



Rangos de longitudes de ondas filtrados por cintas de celofán



Cepillos de Haidinger

azul a lo largo de la horizontal por el pigmento significa que la retina transmite al cerebro el color amarillo complementario como si estuviera a lo largo de la horizontal. Este amarillo está en el eje largo de los cepillos de Haidinger. Las nubes azules en cada lado del reloj de arena no han recibido todavía una explicación adecuada, pero son probablemente psicológicas en el sentido de que el cerebro es responsable de la impresión de que el azul está presente. Si no puede encontrar el reloj de arena mientras mira al cielo con un filtro, puede intentarlo mirando a una pared azul iluminada por el sol. En cualquier caso, para ver el reloj es necesario que haya luz azul polarizada incidente en el ojo.

Los cepillos de Haidinger sirven para algo más que para indicar qué parte del ojo es sensible al sentido de polarización de la luz; puede recurrirse también a ellos para mostrar aquellas otras partes del ojo que son birrefringentes. Para demostrar este efecto, el lector necesita un filtro de polarización lineal y una lámina de un cuarto de onda ajustada al verde o al amarillo. Oriente el filtro para que produzca luz polarizada verticalmente. Ponga, entre éste y su ojo, una lámina de un cuarto de onda con el eje lento inclinado hacia arriba y hacia fuera (si está usted usando su ojo derecho, el eje lento debería ir desde la parte izquierda de abajo hacia la parte alta de arriba). Colocando la lámina de un cuarto de onda de esta forma, el lector hace que los cepillos de Haidinger del filtro lineal cambien su orientación de repente en 90 grados, de la posición horizontal a la vertical. Por el contrario, si el eje lento de la lámina está inclinado hacia arriba y hacia dentro (para el ojo derecho irá desde abajo a la derecha hacia arriba a la izquierda), el reloj de arena desaparecerá. Usando una lámina de semionda (verde o amarilla) en lugar de una de un cuarto de onda, los resultados obtenidos son los opuestos.

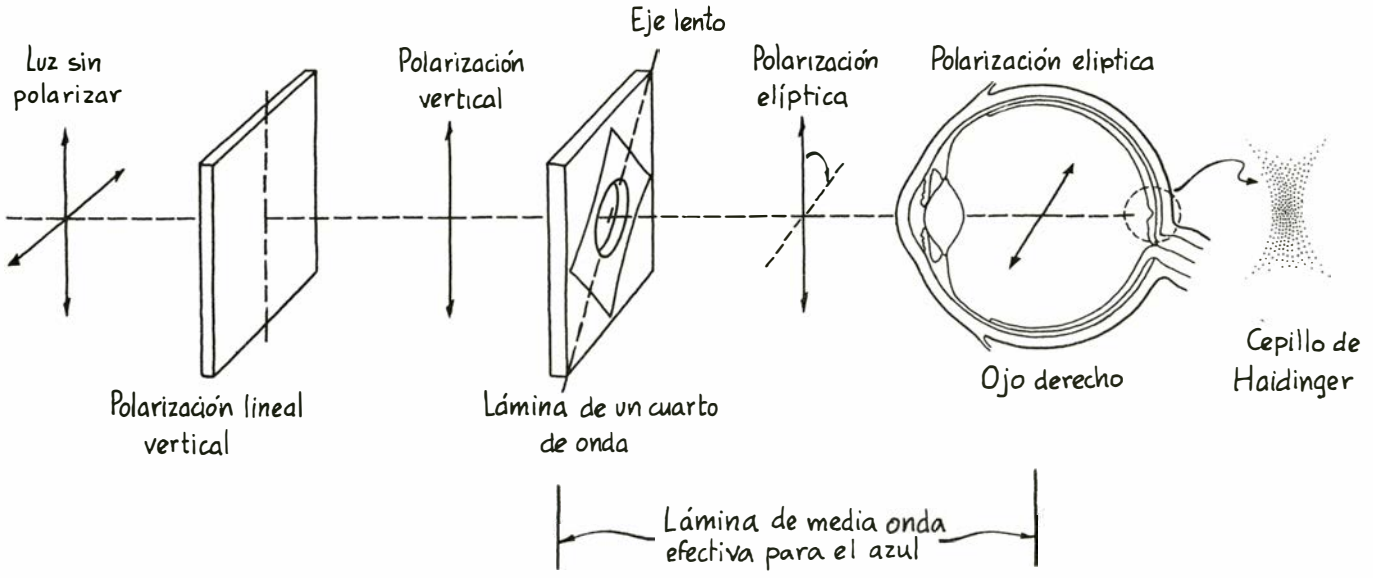
Debido a que los cepillos pueden ser difíciles de ver con su lámina de un cuarto de onda hecha en casa, y usted quizá desee sustituirla, así como el polarizador lineal, por un polarizador circular que la Polaroid Corporation suministra gratuitamente a los lectores de esta sección (Polaroid Corporation. Polarizer Technical Products, 20 Ames Street, Cambridge, Mass. 02139). Pida la tarjeta "Polaroid Circular Polarizes for Contrast Improvements", a la que va pegada el polarizador. Algunos de los usos que pueden hacerse con un polarizador circular constituirán el tema de esta sección el mes próximo.

No se ha dado respuesta a la pregunta de por qué el reloj de arena o bien desaparece o cambia 90 grados. Según parece, el efecto de la lámina colocada detrás del filtro consiste en incrementar la birrefringencia neta de la córnea en un cuarto o en media longitud de onda para la luz azul. Si la lámina citada y la córnea son efectivamente una lámina de un cuarto de onda para luz azul, el cepillo desaparece. Si son efectivamente una lámina de semionda para la luz azul el cepillo salta a una posición perpendicular a la orientación que dé el filtro lineal, si estuviera sólo él.

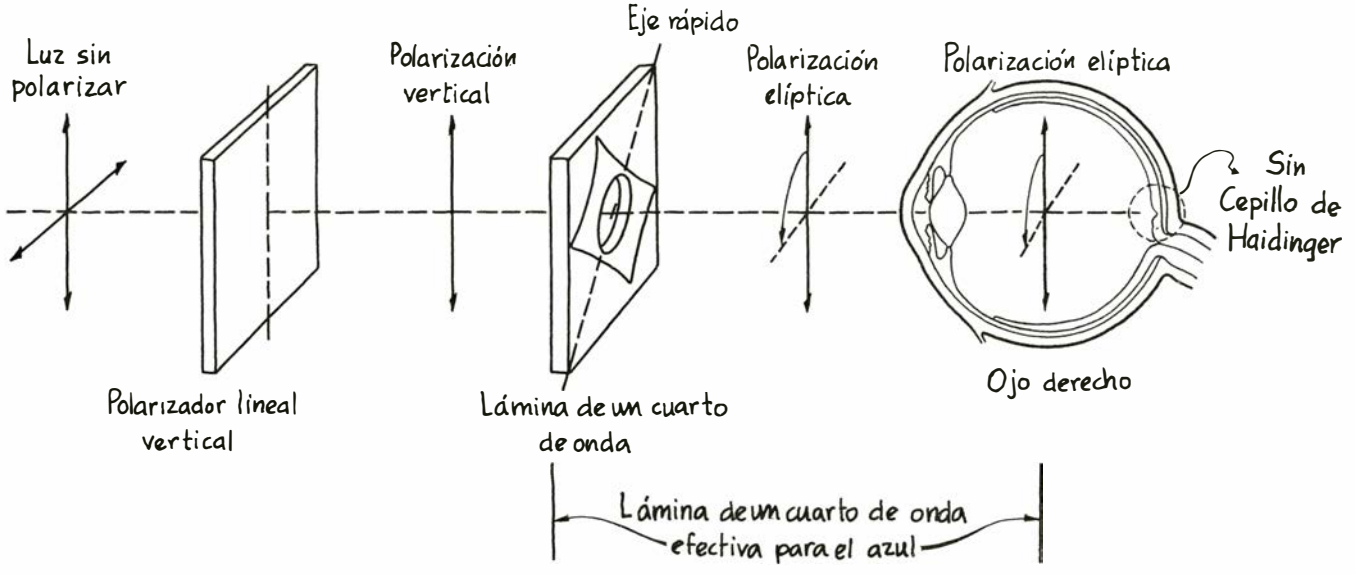
La córnea contiene fibrillas de colágeno que se inclinan principalmente hacia arriba y hacia fuera. Son birrefringentes, con el eje lento a lo largo de la longitud de la fibra y el rápido hacia arriba y hacia dentro. El desfase entre los ejes rápido y lento no es normalmente suficiente para ser percibido, valiendo aproximadamente un doceavo de la longitud de onda de la luz verde. Sin embargo, si la lámina de un cuarto de onda o de semionda se usa correctamente, el desfase total de la lámina y el colágeno juntos puede ser suficiente para cambiar el sentido de polarización de la luz azul incidente y suministrar el necesitado por los cepillos de Haidinger.

Considere que la lámina de un cuarto de onda está orientada con su eje lento hacia arriba y hacia fuera, como está el eje lento de las fibrillas del colágeno. En el verde-amarillo, la lámina de un cuarto de onda produce un desfase de aproximadamente un cuarto de una longitud de onda y el colágeno produce un desfase adicional de aproximadamente un doceavo, dando un desfase total de un tercio de una longitud de onda más o menos en la zona de ese color. Otros colores cambian proporcionalmente a su longitud de onda, siendo el cambio del azul menor que el del rojo.

Dado que los cepillos de Haidinger dependen de la luz azul, el cambio en el azul es el interesante. El desfase total en el azul es de unos dos quintos de la longitud de onda del azul. Así, la lámina de un cuarto de onda y su córnea actúan combinadas como una lámina de semionda en el azul, más o menos. La luz polarizada verticalmente, y transmitida a través de una lámina de semionda orientada con el eje lento perpendicular a la polarización, cambia ésta en 90 grados (de vertical a horizontal en este caso). De la misma forma, los cepillos saltan de la posición horizontal, cuando no hay lámina colocada, a la vertical cuando se pone la lámina, siempre que ésta tenga la posición correcta.



Comportamiento respecto al ojo, a modo de lámina de semionda,por parte de una lámina de un cuarto de onda y las fibrillas de colágeno



Resultado de una lámina de un cuarto de onda y el ojo

Si la lámina de cuarto de onda tiene su eje lento hacia arriba y hacia dentro, se eliminan los cepillos. En la zona del verde-amarillo, la lámina cambia la fase de la luz en un cuarto de longitud de onda, aproximadamente, en una dirección y el colágeno en un doceavo de longitud de onda en la dirección opuesta, dando un desfase neto de un sexto de longitud de onda, en el verde-amarillo. En el azul se produce un desfase neto de un quinto de longitud de onda. En otras palabras, la combinación del colágeno y de la lámina de un cuarto de onda orientada de este modo origina, efectivamente, una lámina de un cuarto de onda en el azul.

La combinación produce luz polarizada elípticamente, que ilumina la mácula lútea, pero la luz de este tipo no produce los cepillos de Haidinger. Con este sentido de orientación de la lámina de un cuarto de onda, los cepillos desaparecen.

El efecto de una lámina de semionda, colocada entre un filtro de polarización orientado verticalmente y su ojo, es similar. Con el eje lento hacia arriba y hacia fuera, el desfase total producido por la lámina y su córnea es aproximadamente tres cuartos de longitud de onda en el azul. La lámina y la córnea actúan pues, como una lámina de un cuarto de onda en el azul, produciendo luz polarizada elípticamente para la retina. No aparecen cepillos. Con el eje lento hacia arriba y hacia dentro el desfase neto es, más o menos, la mitad de la longitud de onda en el azul. Esta vez, la lámina y la córnea juntas actúan como una lámina de semionda en el azul; hacen variar el sentido de la luz incidente linealmente polarizada en 90 grados y, por tanto, giran los cepillos de Haidinger desde la posición horizontal a la vertical.

Si el lector consigue ver los efectos con las disposiciones precedentes, es posible que desee experimentar sobre otras orientaciones relativas del filtro polarizado linealmente, con respecto a la lámina de un cuarto de onda o semionda y a las fibrillas de colágeno. Los principios son los mismos, pero la predición del resultado en cada caso sería una buena manera de probar sus conocimientos sobre cómo funcionan las láminas de un cuarto y de media onda.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

MICROTUBULOS Y FUNCION CELULAR

MICROTUBULES AND MICROTUBULE INHIBITORS. Dirigido por M. Borgers y M. De Brabander. North Holland-American Elsevier (553 pág., 1975).

CELL MOTILITY. Dirigido por R. Goldman, T. Pollard y J. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Conferences on Cell Proliferation (vol. C, 1976).

LA SECUENCIA NUCLEOTIDICA DE UN ADN VIRICO

A RAPID METHOD FOR DETERMINING SEQUENCES IN DNA BY PRIMED SYNTHESIS WITH DNA POLYMERASE. Frederick Sanger y Alan R. Coulson en *Journal of Molecular Biology,* vol. 94, n.º 3, págs. 441-448; 25 de mayo de 1975.

OVERLAPPING GENES IN BACTERIOPHAGE ΦX174. B. G. Barrell, G. M. Air y C. A. Hutchison III en *Nature,* vol. 264, n.º 5581, págs. 34-41; 4 de noviembre de 1976.

NUCLEOTIDE SEQUENCE OF BACTERIOPHAGE ΦX174 DNA. Frederick Sanger, G. M. Air, B. G. Barrell, N. L. Brown, Alan R. Coulson, John C. Fiddes, C. A. Hutchison III, P. M. Slocombe y M. Smith en *Nature,* vol. 265, n.º 5595, págs. 687-695; 24 de febrero de 1977.

EL MOVIMIENTO DEL SUELO EN LOS TERREMOTOS

MECHANISM OF THE CHILEAN EARTHQUAKES OF MAY 21 AND 22, 1960. George Plafker y J. C. Savage en *Geological Society of America Bulletin,* vol. 81, n.º 4, págs. 1001-1030; abril 1970.

EARTHQUAKE SHAKING AND DAMAGE TO BUILDINGS. Robert A. Page, John A. Blume y William B. Joyner en *Science,* vol. 189, n.º 4203, págs. 601-608; 22 de agosto de 1975.

STRONG-MOTION RECORDINGS OF THE CALIFORNIA EARTHQUAKE OF APRIL 18, 1906. David M. Boore en *Bulletin of the Seismological Society of America,* vol. 67, n.º 3, págs. 561-577; jun. 1977.

LA EPIDEMIOLOGIA DE LA GRIPE

THE GREAT EPIDEMIC. Adolph A. Hoehling. Little, Brown & Co., 1961.

THE INFLUENZA VIRUSES AND INFLUENZA. Dirigido por Edwin D. Kilbourne. Academic Press, Inc., 1975.

EPIDEMIC AND PEACE, 1918. Alfred W. Crosby, Jr. Greenwood Press, 1976.

LA TEORIA RETINEX DE LA VISION DEL COLOR

COLOR VISION AND THE NATURAL IMAGE: PART I. Edwin H. Land en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 45, n.º 1, págs. 115-129; enero, 1959.

COLOR VISION AND THE NATURAL IMAGE; PART II. Edwin H. Land en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 45, n.º 4, págs. 636-644; abril, 1959.

INTERACTION OF THE LONG-WAVE CONES AND THE RODS TO PRODUCE COLOR SENSATIONS. John J. McCann y Jeanne L. Benton en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 59 n.º 1, págs. 103-107; enero, 1969.

LIGHTNESS AND RETINEX THEORY. Edwin H. Land y John J. McCann en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 61, n.º 1, págs. 1-11; enero, 1971.

DISCLINACIONES

THEORY OF CRYSTAL DISLOCATIONS. Frank R. N. Nabarro. Clarendon Press, 1967.

THE GEOMETRY OF DISCLINATIONS IN CRYSTALS. William F. Harris en *Surface and Defect Properties of Solids, Vol. 3: A Review of the Recent Literature Published up to April, 1973.* The Chemical Society, London, 1974.

NEGATIVE WEDGE DISCLINATIONS OF ROTATION 2π RADIANS AND TOPOLOGICAL CHANGES OF MEMBRANOUS SYSTEMS. William F. Harris en *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical, Experimental and Applied Physics,* vol. 32, n.º 1, págs. 37-41; julio, 1975.

HORMIGAS TEJEDORAS

WEAVER ANTS: SOCIAL ESTABLISHMENT AND MAINTENANCE OF TERRITORY. Berthold K. Hölldobler y Edward O. Wilson en *Science,* vol. 195, n.º 4281, págs. 900-902; 4 de marzo de 1977.

COLONY-SPECIFIC TERRITORIAL PHEROMONE IN THE AFRICAN WEAVER ANT *OECOPHYLLA LONGINODA* (LATREILLE). Berthold K. Hölldobler y Edward O. Wilson en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 74, n.º 5, págs. 2072-2075; mayo 1977.

UNA ALDEA CELTICA EN EL SUR DE INGLATERRA

THE IRON AGE SETTLEMENT OF GUSSAGE ALL SAINTS. Geoffrey Wainwright y Mansel G. Spratling en *Antiquity,* vol. 47, págs. 109-130; 1973.

IRON AGE COMMUNITIES IN BRITAIN: AN ACCOUNT OF ENGLAND, SCOTLAND AND WALES FROM THE SEVENTH CENTURY B.C. UNTIL THE ROMAN CONQUEST. Barry Cunliffe. Routledge & Kegan Paul, 1974.

THE IRON AGE IN LOWLAND BRITAIN. Derek W. Harding. Routledge & Kegan Paul, 1974.

JUEGOS MATEMATICOS

A CONSECUTIVE-DIGIT PRIME. Joseph S. Madachy en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 4, n.º 2, pág. 100; abril, 1971.

CONSECUTIVE-DIGIT PRIMES – AGAIN. Joseph S. Madachy en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 5, n.º 4, págs. 253-254; octubre, 1972.

CONSECUTIVE-DIGIT PRIMES (ROUND 3). Raphael Finkelstein y Judy Leybourne en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 6, n.º 3, págs. 204-206; verano, 1973.

THE JUPITER EFFECT. John R. Gribbin y Stephen H. Plagemann. Macmillan, 1974.

TALLER Y LABORATORIO

POLARIZED LIGHT. William A. Shurcliffe y Stanley S. Ballard. D. Van Nostrand Company, 1964.

WAVES. Frank S. Crawford. McGraw-Hill Book Company, 1968.

HAIDINGER'S BRUSHES AND PREDOMINANT ORIENTATION OF COLLAGEN IN CORNEAL STROMA. C. C. D. Shute en *Nature,* vol. 250, n.º 5462, págs. 163-164; 12 de julio de 1974.

Taller y laboratorio

Más sobre los polarizadores y cómo usarlos en el estudio de la luz polarizada del cielo

Jearl Walker

Una de las fuentes naturales de luz polarizada es el cielo. Como escribió Lord Rayleigh, en 1871, dicha polarización es provocada por la dispersión de la luz solar al chocar con las moléculas del aire (fenómeno que también es causa del color azulado del cielo). En un día claro, gran parte de la luz que nos llega del firmamento viene linealmente polarizada, circunstancia de la cual se valen las abejas y otros animales para orientarse. Incluso hay razones para creer que los antiguos vikingos también se orientaban, cuando navegaban por mar abierto, gracias a la polarización de la luz del cielo.

Imaginemos un rayo de luz que, procedente del sol, se encuentre con una molécula de un gas de los que forman el aire. Consideremos como si la luz sin polarizar tuviera dos sentidos de polarización, un sentido contenido en el plano que determinan el sol, la molécula de gas y el observador situado en la tierra, y el otro sentido de polarización contenido en el plano perpendicular al anterior. Los dos sentidos de polarización (que llamaremos, respectivamente, paralelo y perpendicular) representan las direcciones a lo largo de las cuales oscilan los campos eléctricos que provocan la luz.

Ambos sentidos de oscilación dan lugar a que los electrones de la molécula con la que han chocado oscilen y reemitan luz. Sin embargo, la oscilación de un campo eléctrico que oscila a lo largo de una determinada dirección, al chocar con el electrón, no hace que éste emita radiaciones que oscilan a lo largo de dicha dirección, sino que el electrón suele emitir radiaciones que oscilan principalmente en un plano perpendicular al de la dirección de oscilación de la luz que lo originó. Progresivamente va emitiendo radiaciones, en menor proporción, en las direcciones que se van acercando a la dirección de la oscilación.

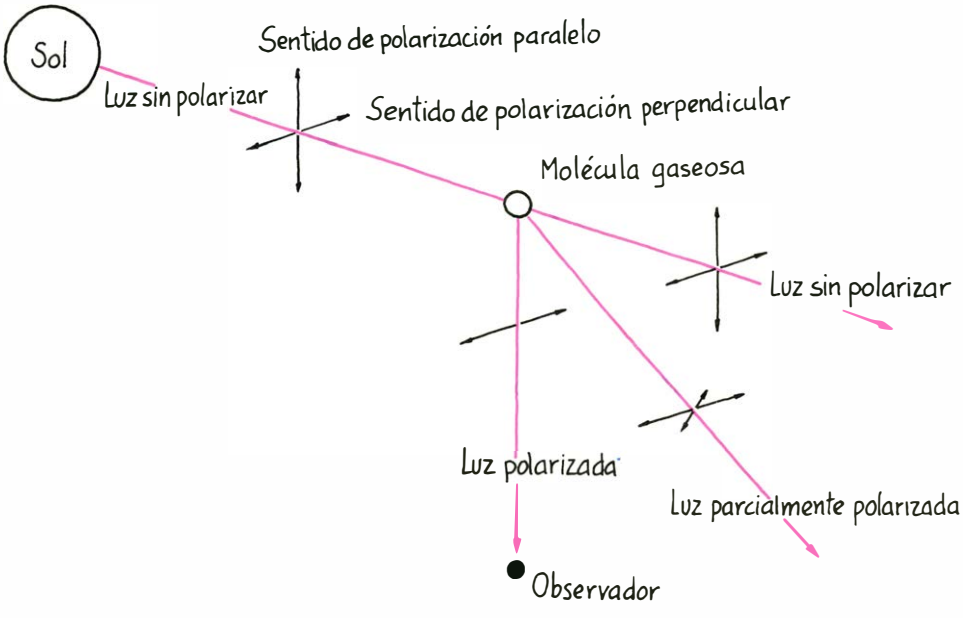
¿Cómo se explica con la hipótesis anterior la polarización de la luz solar dispersada a partir de una molécula de aire que el observador ve? Consideremos un observador situado directamente debajo de una molécula iluminada por la luz del sol cuando éste se encuentra en el ocaso. El sentido de polarización perpendicular de dicha luz al incidir en la molécula es desviado con bastante intensidad hacia el observador, mientras que el sentido de polarización paralelo no se dispersa en modo alguno. El resultado neto para el observador es que la luz procedente del sol sin polarizar, se polariza por la dispersión que sufre al chocar con las moléculas, y el observador lo que ve es luz polarizada.

El lector puede hacer un gráfico del tipo o grado de polarización de distintas zonas del cielo con un filtro polarizador. Primero oriente el filtro, es decir, averigüe en qué sentido polariza dicho filtro; para ello, examine la luz reflejada por la calzada o por cualquier otra superficie lisa (describí el sistema el mes pasado). Cuando el resplandor del reflejo en una superficie lisa queda bloqueado por el filtro, el sentido de polarización que éste deja pasar es el perpendicular a dicha superficie.

Ahora examine una zona del cielo. Dependiendo de la posición del sol, la luz que le llega de dicha zona estará polarizada principalmente en el sentido perpendicular al plano que contiene el sol, a la zona del cielo y al observador. Cuando el sol esté próximo al horizonte, la zona que da la luz con mayor grado de polarización será la que esté directamente encima de su cabeza. La polarización decaerá a medida que el observador vaya mirando a través del filtro las distintas zonas del cielo a lo largo de toda la dirección diametral en la que el sol se encuentre. (Nunca se debe mirar directamente al sol, ni siquiera a través de algo que el observador crea que es un filtro negro u obscuro. El filtro puede que sea eficaz en el rango de luz visible, pero puede permitir pasar cantidades peligrosas de radiaciones, bien del sector del infrarrojo bien del sector del ultravioleta. Tanto unas como otras pueden dañar los ojos antes de que el interesado se dé cuenta de ello.)

Cuando el sol esté bajo, la luz procedente de la zona del cielo cerca del horizonte, pero a 90 grados del sol (es decir, el Norte o el Sur geográfico cuando el sol se halle en el ocaso), estaría polarizada tan intensamente como la que viene de la zona del cielo justo encima de la cabeza del observador. Pero la luz que viene de aquel horizonte tiene que atravesar mucha zona de atmósfera terrestre, de manera que, probablemente, se ha dispersado más de una vez, debido a los choques con las múltiples partículas atomizadas o aerosoles existentes en la atmósfera. Todos estos hechos hacen decrecer el grado de polarización.

Las nubes destruyen también la polarización debido a las múltiples veces que



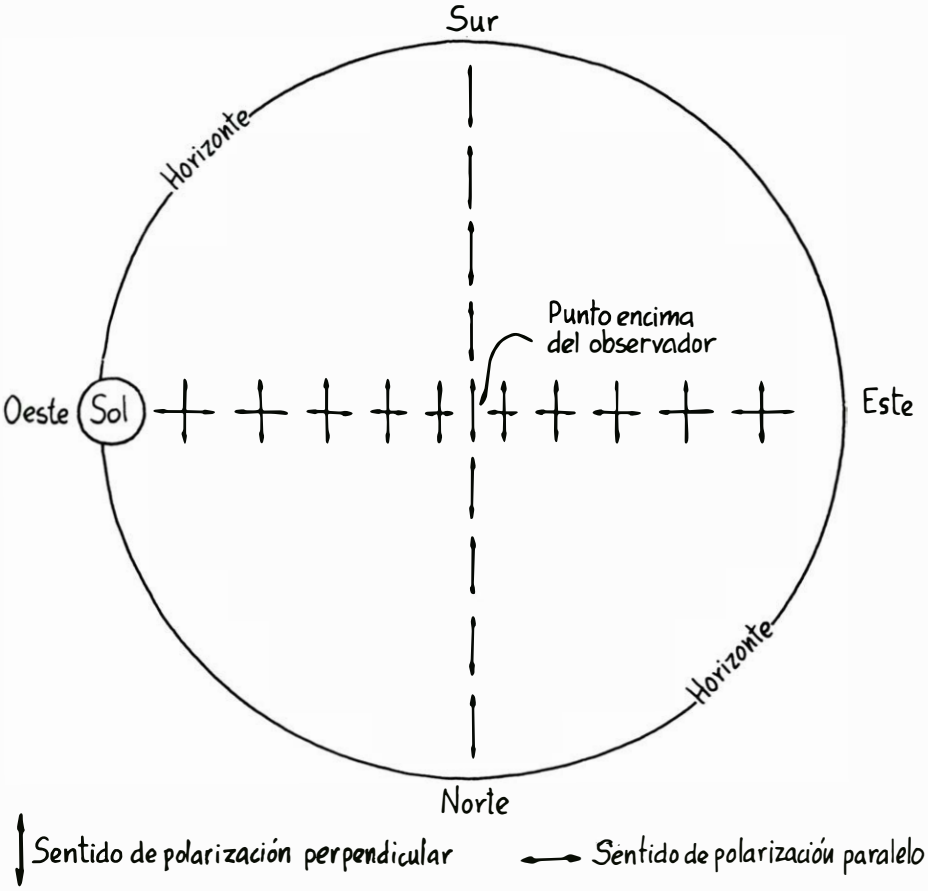
Polarización de la luz solar al ser dispersada por las moléculas gaseosas del aire

la luz se dispersa al atravesarlas; este efecto es utilizado con bastante frecuencia por los fotógrafos. Con un filtro polarizador orientado de forma adecuada y colocado delante del objetivo de una cámara fotográfica, la luz polarizada que viene del fondo del cielo es bloqueada en una proporción bastante grande (función de su grado de polarización), mientras que la luz que viene de las nubes, aunque también en parte esté bloqueada por el filtro, lo es en bastante menor proporción, puesto que su grado de polarización es bastante menor también. A consecuencia de lo cual, en la foto las nubes destacan sobre el fondo del cielo.

Se puede construir un aparato muy útil para determinar la polarización de la luz del cielo a partir de varios filtros polarizadores pequeños o a partir de una lámina polarizadora grande. En cualquiera de los dos casos, se deben recortar doce triángulos isósceles de manera que el ángulo distinto sea de 30 grados y el sentido de polarización de cada uno de los mismos sea paralelo a la base. Estos triángulos se colocan sobre una superficie de cristal transparente situándolos de manera que formen un dodecágono. Los bordes del triángulo se deben sujetar al cristal o bien con cinta de celofán o con pegamento. Si se usa este segundo procedimiento hay que tener cuidado de no pegar la superficie completa de los triángulos al cristal, ya que el medio adhesivo puede alterar la polarización de la luz que filtre el conjunto.

Cuando el observador mire al cielo a través del dodecágono, verá triángulos iluminados y otros obscuros, de acuerdo con la polarización de la luz del cielo. Ahora ya no es necesario hacer girar el sistema como cuando se usaba sólo un filtro polarizador. Para hacer que la polarización, o al menos los colores se destaquen más, basta colocar una o dos capas de cinta de celofán transparente sobre los triángulos antes de recortarlos. La cinta se debe orientar de manera que forme 45 grados con el sentido de polarización de los filtros de forma que cada triángulo pueda actuar de hecho como una lámina de media onda del tipo de las que describimos el pasado mes. La cinta debe colocarse en la cara de los triángulos que mira al cielo. La luz linealmente polarizada del cielo atraviesa la cinta y sufre un desfase entre los ejes rápido y lento de la cinta. La luz sale con una polarización diferente de acuerdo con su color.

El filtro sobre el cual la cinta se pega determina qué color se verá. A través de este montaje, equivalente a una lámina de media onda, el cielo aparece de diferentes colores por los diferentes triángulos. Con una sola capa de cinta adhesiva, encontré una variedad de colores en todo el círculo del aparato, que iba desde el azul claro (que es el que tiene el cielo realmente) al intenso. Con dos capas, la variación va desde el amarillo-verde al azul.



Esquema del cielo donde se indica el sentido de polarización de la luz según el modelo de dispersión de Rayleigh

Hoy los filtros polarizadores pueden emplearse para determinar la polarización del cielo con el fin de orientarse en la navegación. Hasta 1928 no fue desarrollado –por Edwin H. Land– un polarizador de este tipo. Anteriormente, la polarización del cielo sólo se podía comprobar con los cepillos de Haidinger (curiosa figura que algunas personas ven cuando miran la luz polarizada) o con los cristales dicroicos y birrefringentes que describí el mes pasado.

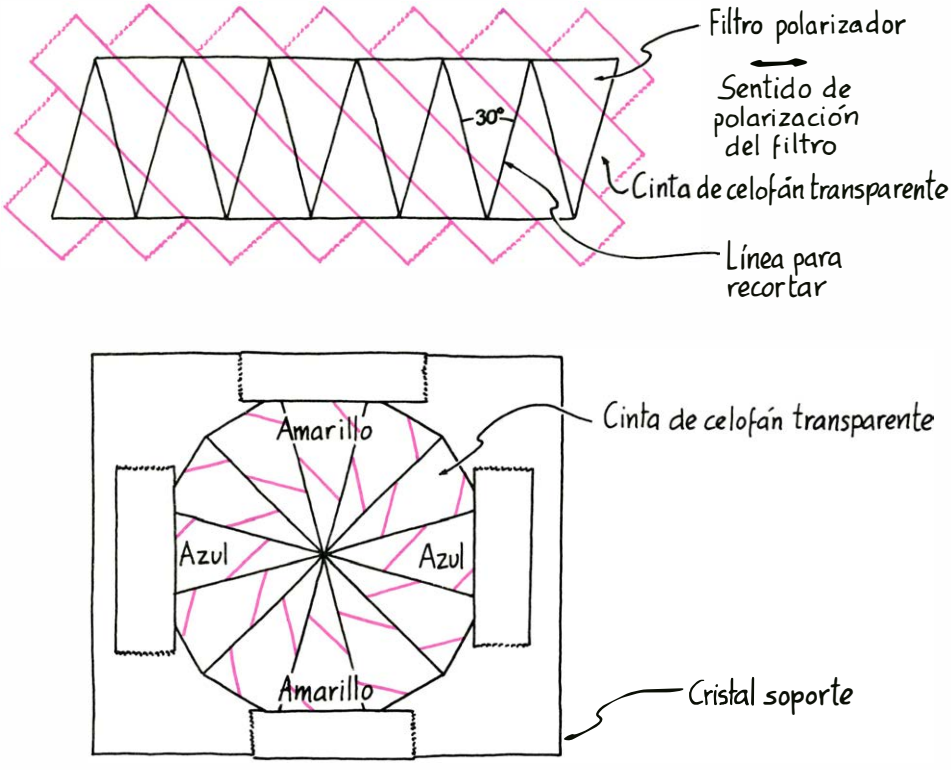
El artilugio que permitió a los vikingos cruzar el Atlántico con la ayuda de la luz linealmente polarizada del cielo pudo haber sido muy bien un cristal dicroico. No teniendo brújula, podían perderse cuando el sol se ocultaba por el horizonte, cosa bastante frecuente por las altas latitudes de su región de origen. Varios tipos de cristal pudieron haberles servido como "piedras del sol", pero el arqueólogo danés Thorkild Ramskou cree que probablemente usaron un simple cristal de cordierita.

A Ramskou le dio la idea un muchacho de diez años, cuyo padre era piloto de la compañía aérea Scandinavian Airlines. Este chico encontró relación entre las viejas historias de las piedras de sol y el instrumento llamado brújula del crepúsculo, con el que su padre localizaba el sol incluso cuando estaba oculto por las nubes o había descendido tras el horizonte. Un piloto moderno detecta, con un filtro polarizador, el sentido de polarización de la luz procedente de una parte despejada del cielo; el instrumento señala entonces una dirección perpendicular a aquel sentido y, por tanto, lo que indica es la dirección diametral en la que el sol se encuentra. Usando la brújula del crepúsculo se puede localizar la posición del sol con bastante precisión, conociendo aproximadamente en qué dirección se encuentra el mismo.

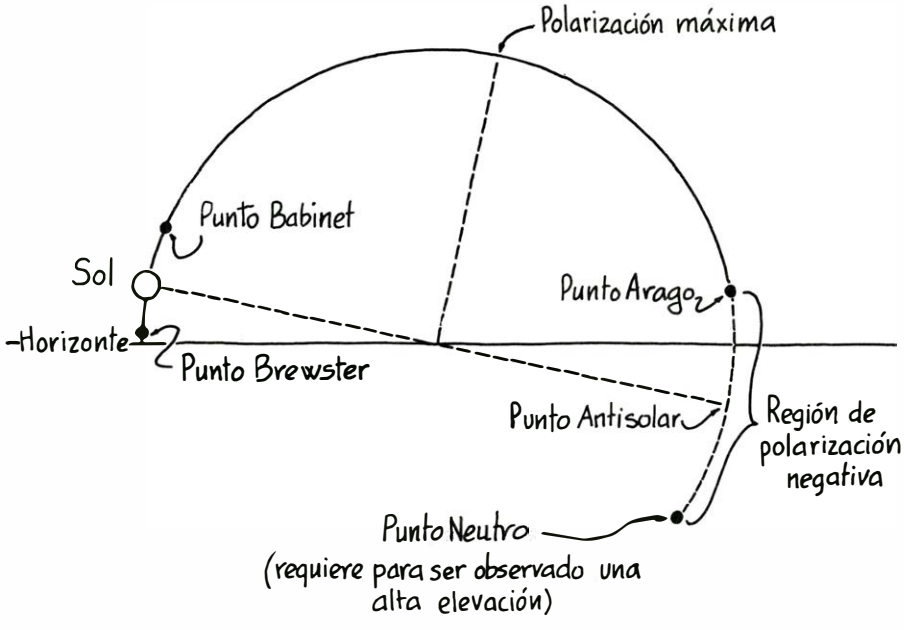
La cordierita se comporta dicroicamente cuando sus ejes rápido y lento son perpendiculares a la luz incidente que le llega del cielo. Rotando el cristal, pero manteniéndolo perpendicular a la dirección de la luz, se provocan una serie de

ejes distintos paralelos al sentido de polarización de la luz incidente. Con el eje rápido alineado, el cristal es o bien claro o ligeramente amarillo, al mirar a su través. Si es el eje lento el que está alineado, se ve azul. Un piloto vikingo cayó en la cuenta de cómo había que orientar (con respecto al sol) su cristal para que diera luz azul, por tanto, él podría encontrar el sol aunque estuviese escondido tras el horizonte u oculto detrás de algunas nubes, sin más esfuerzo que reorientar su cristal, enfocando una parte despejada del cielo, hasta que el cristal diera de nuevo el color azul (si todo el cielo estaba cubierto por las nubes, no había, por tanto, ninguna luz polarizada y el vikingo ese día no estaba de suerte).

Ramskou voló junto con el piloto de la Scandinavian Airlines para comparar la indicación de la localización del sol hecha con la cordierita y con la brújula del crepúsculo. Así comprobó que la indicación sobre dónde estaba el sol hecha con su "piedra del sol" tenía un error de aproximadamente 3 grados. También detectaba la dirección en que se encontraba el sol, incluso hasta cuando éste se hallaba 7 grados por debajo del horizonte. Si el lector tiene la posibilidad de disponer de un cristal de cordierita o de algún otro cristal dicroico similar como la turmalina, puede tratar de hacer un experimento parecido.



Forma de hacer un dodecágono de láminas de media onda para estudiar la polarización de la luz del cielo



Puntos neutros y zona de polarización "negativa"

Gran parte de lo que se sabe acerca de la luz polarizada del cielo está basado en los trabajos de Lord Rayleigh. Su tesis sobre la polarización del cielo se puede observar de la siguiente forma. Primero, si el aire está lo suficientemente poluto, la dispersión múltiple de la luz, así como la dispersión provocada por partículas de tamaño aproximado (o incluso mayor) a la longitud de onda de la luz visible, destruye el sentido de polarización en el modelo de Rayleigh. Puede verse esta destrucción en días de gran polución atmosférica, ya sea causada por el hombre o por motivos naturales, como, por ejemplo, las erupciones volcánicas.

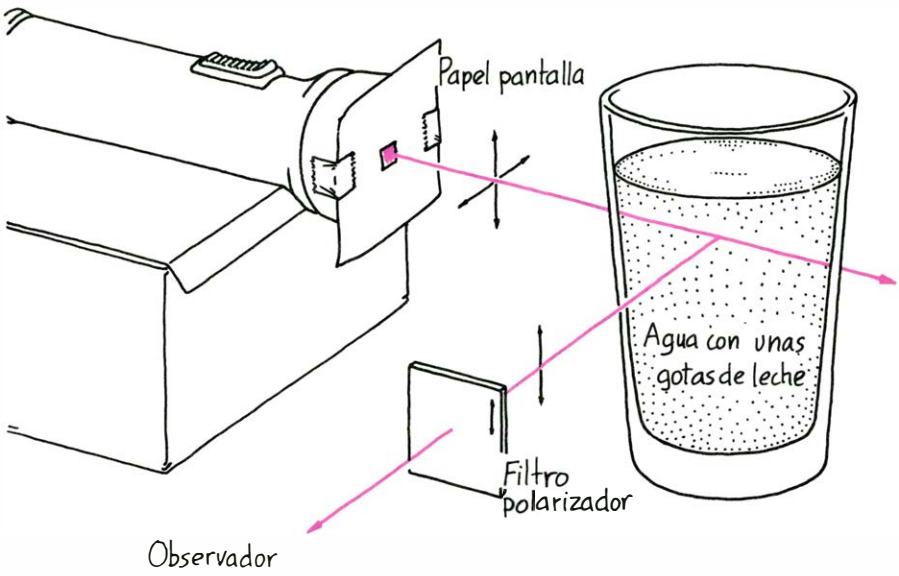
La otra aplicación del modelo de Rayleigh es más curiosa. Si se examina atentamente el cielo cerca del sol o cerca del punto antisolar (que es el punto exactamente opuesto al anterior en el espacio), encontraremos varios puntos que están sin polarizar y también una pequeña zona con el sentido de polarización opuesto, denominada polarización negativa. A los puntos se les llama puntos neutros y se le han dado diversos apellidos según los varios descubridores que ha tenido. La justificación de los puntos neutros y de la zona de polarización negativa es todavía en ciertos aspectos motivo de controversia, pero parece ser debido tanto a la dispersión múltiple de la luz solar como a la dispersión debida a los aerosoles, principalmente en las zonas bajas de la atmósfera.

El punto neutral que separa el área de polarización negativa del área de polarización positiva (normal) es conocido como "punto de Arago" (en honor de D. F. J. Arago, astrónomo y físico francés de principios del siglo XIX). Yo puedo localizar el punto de Arago esperando hasta que el sol esté cerca del horizonte, y entonces busco la región de polarización negativa cerca del punto antisolar. La posición del punto de Arago (y, por tanto, la zona angular de la región de polarización negativa) depende de la longitud de onda de luz que se considere, de la elevación del sol y de la amplitud de la reflexión de la luz en la superficie de la tierra. Por ejemplo, si se coloca un

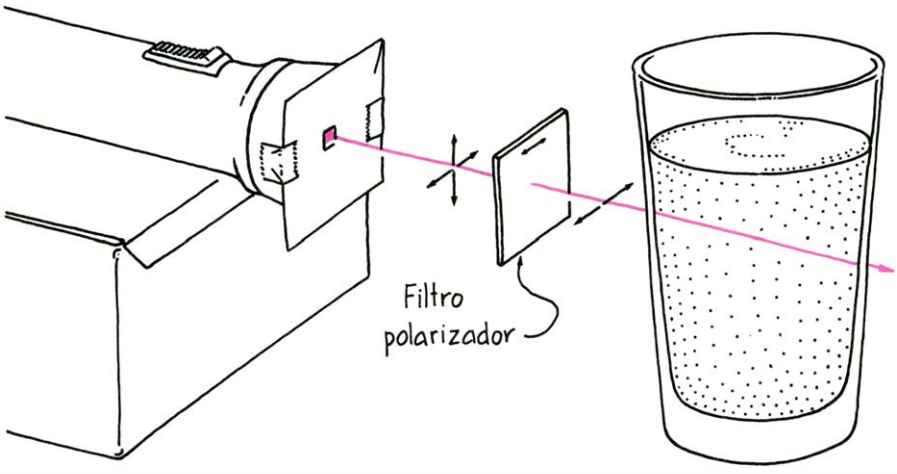
filtro azul o rojo sobre el filtro polarizador (se puede usar para ello un papel de celofán azul o rojo), verá que el punto de Arago para el azul está situado más arriba que para el rojo. La posición de dicho punto también depende de la elevación en que se encuentre el sol; mientras más bajo esté menor será la zona de atmósfera cercana a la tierra que esté iluminada.

Si el observador empieza con el punto de Arago mirando al punto antisolar con el sol en el ocaso a su espalda, al principio el punto de Arago se mueve ligeramente hacia fuera (arriba) desde el punto antisolar y retrocediendo como si buscara al sol en el horizonte. En el ocaso, la atmósfera que está más cerca del suelo, en donde la dispersión múltiple y la dispersión aerosolar responsable de la polarización negativa tienen lugar, no está demasiado bien iluminada, cuando, por el contrario, la parte superior de la atmósfera aún lo está. En consecuencia, la región de polarización negativa se hace más pequeña y la región de la polarización positiva aumenta, moviendo el punto de Arago hasta acercarlo al punto antisolar. Con el sol por debajo del horizonte, el punto de Arago se mueve otra vez hacia fuera del punto antisolar. El movimiento total del punto de Arago con respecto al punto antisolar es de 5 grados aproximadamente. El tercer efecto sobre la posición del punto de Arago es atribuible a la luz reflejada por la superficie terrestre. Con una gran reflexión, como en el caso de que se reflejara sobre una gran masa de agua, el punto desciende unos cuantos grados.

Mientras que la luz dispersada por las moléculas puede ser fuertemente polarizada y la dispersada por partículas grandes puede ser no polarizada o polarizada solo débilmente, las partículas de niebla de tamaño intermedio producen también un grado intermedio de polarización. Esta polarización intermedia tiene efectos interesantes en los objetos distantes obscurecidos por la niebla. Por ejemplo, las montañas de San Gabriel, en California, se ocultan con frecuencia debido a la nube de polución que se forma sobre Los Angeles. Sin embargo, usando gafas de sol polarizadas o cualquier otro filtro polarizador, se pueden ver estas montañas a pesar de la polución. Warren H. White, del Meteorology Research Inc., explica que la diferencia de visibilidad se debe al grado de polarización de la nube de polución, lo cual permite determinar el tamaño aproximado de las partículas de ésta. Orientando el filtro de una manera determinada se distinguen las cumbres de las montañas recortadas sobre el firmamento, pero los accidentes de las laderas no son visibles. Sin embargo, si se gira el filtro 90 grados cambia el sentido de la polarización transmitida, lo que hace que desaparezcan de la vista las cumbres de las montañas y que sean perceptibles los accidentes del relieve.



Efecto de dispersión producido por una suspensión coloidal de leche en agua



Efecto de una dispersión cuando la luz incidente está horizontalmente polarizada

Si las partículas de la nube de polución fueran muy pequeñas comparadas con la longitud de onda de la luz visible, supongamos que tuvieran diámetros inferiores a 0,05 micrones, polarizarían la luz como lo hacen las moléculas individuales en el modelo de Rayleigh. Si las partículas fueran mayores que las longitudes de onda de la luz visible, con diámetros superiores a los 5 micrones, la luz dispersada se polarizaría muy débilmente. Supongamos un rayo de luz solar que llega a las montañas formando un ángulo de 45 grados con la vertical. Con la primera orientación del filtro se distinguen las cimas de las montañas porque la luz del cielo sobre el que se recorta está más polarizada que la dispersada por la nube de polución situada entre las cimas y el observador. La luz del cielo es, por tanto, más brillante que la que reflejan las cimas, y el contraste es evidente.

Al girar el filtro 90 grados, la luz del cielo y la de las cumbres son bloqueadas, pero se hacen visibles algunos accidentes de las laderas. Son las zonas orientadas adecuadamente para polarizar la luz solar reflejada, de forma similar a lo que ocurre en la superficie de una carretera. Aunque esta luz está polarizada sólo débilmente, se distingue con facilidad porque la luz del resto de la montaña está polarizada por la nube de polución de tal manera que se bloquea con la nueva orientación del filtro. Debido a que la nube de polución polariza la luz más intensamente que los accidentes de la superficie, pero no tan intensamente como el aire limpio más lejano, podemos deducir que los diámetros de las partículas de polución deben medir entre 0,05 y 5

micrones. Esta conclusión ha sido confirmada por investigaciones más profundas que sitúan el rango entre 0,1 y 1 micrón.

He visto un efecto similar al observar cómo desaparecen los barcos debido a la nube de polución de Cleveland cuando navegan hacia el Lago Erie. Si el lector vive en un entorno que tenga un nivel comparable de polución, quizá desee repetir el experimento de White y buscar la correspondencia entre el tamaño del aerosol y la estación. El mismo experimento se podría llevar a cabo con las nieblas azules que cubren algunos tipos de montañas, tales como las de Blue Ridge en el oeste de Virginia y las Montañas Azules en Australia. Se cree que estas nieblas tienen su origen en las pequeñas partículas de cera que desprende la vegetación como consecuencia de los campos electrostáticos relativamente altos que existen cerca de los extremos del follaje. Las partículas son inferiores a los 6 micrones de diámetro y por ello producen cierta polarización al dispersar la luz del sol.

La polarización parcial de la luz dispersada por un aerosol puede ser simulada en la cocina por medio de un experimento simple. Tape casi todo el frente de un foco (o cualquier fuente de luz similar) y deje que pase sólo un rectángulo estrecho de luz. Coloque el foco de manera que la luz pase a través de un vaso de agua limpia, apague las luces de la habitación y examine el cristal del vaso por el lado perpendicular al haz de luz (es mejor un haz de luz no muy potente porque así se evita la iluminación excesiva de las paredes del vaso).

Si el agua está muy limpia, será demasiado transparente para dispersar luz perpendicularmente y el vaso aparecerá obscuro. Cada molécula de agua está dispersando luz en todas direcciones en la habitación, pero la luz dispersada por una molécula interfiere anulando la luz dispersada por otra en todas direcciones, excepto la que va en la dirección del haz de luz. El rayo de luz se reconstruye, pues, en esa dirección y no existe dispersión de luz neta en otras direcciones.

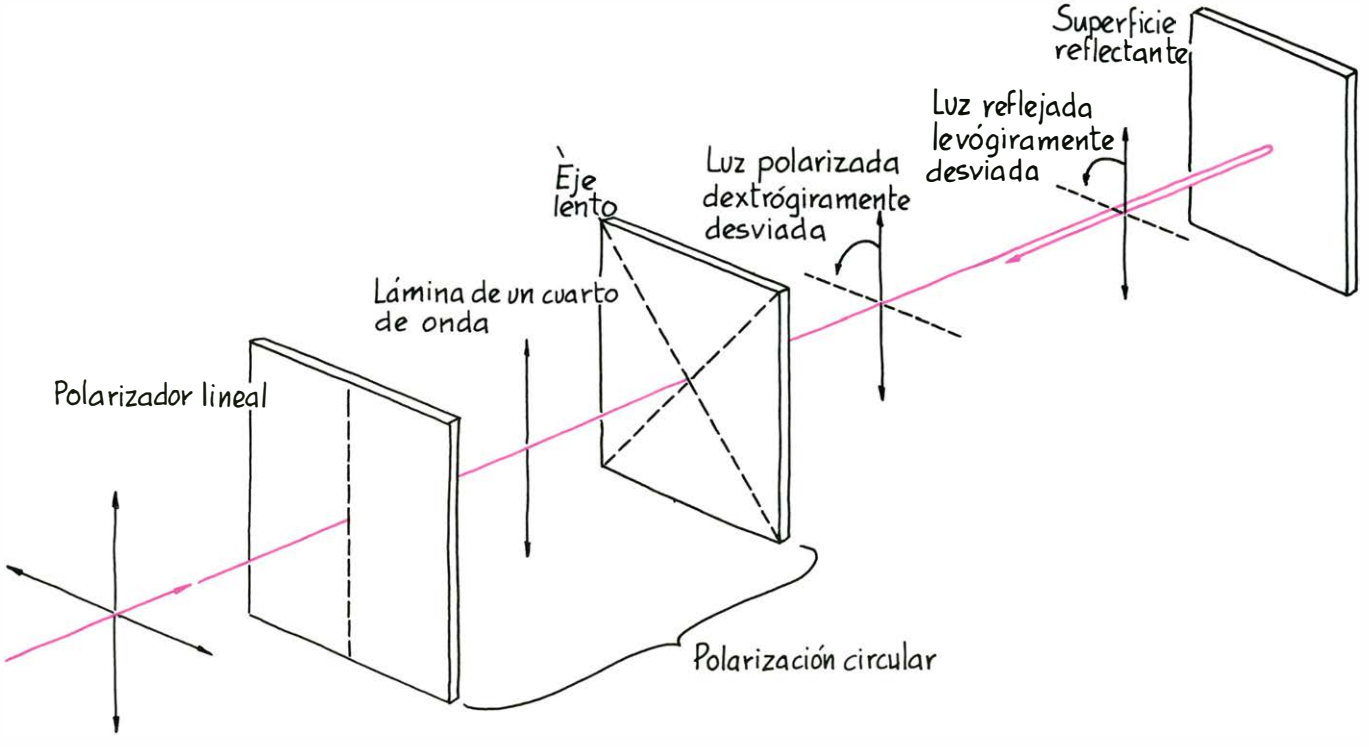
Para continuar con el experimento añada unas cuantas gotas de leche. Antes de comprobar la dispersión perpendicular, observe los colores de la leche. El azul es dispersado en línea recta más fuertemente que el rojo y los colores entre azul y rojo del espectro se difunden en ángulos intermedios. Si se mira la leche desde el lado de donde está iluminado el foco, la leche parece azulada. Si se mira desde el otro lado (hacia el haz de luz) la misma aparece rojiza.

Esta distribución de los colores es similar al aspecto general del cielo durante el día, aunque la dispersión no es exactamente la misma. Cuando la luz es dispersada por moléculas de aire según el modelo de Rayleigh, la luz azul se dispersa más fuertemente que la roja. La consecuencia es que todo el cielo es azul la mayor parte del día. Cuando el sol se está poniendo o saliendo, el azul es dispersado debido a la luz próxima al horizonte, quedando fundamentalmente el rojo, que es la razón por la cual una puesta o una salida de sol son rojas. La luz difundida por la leche no es dispersada por moléculas individuales porque la leche no está disuelta en el agua. La leche forma más bien una suspensión coloidal de pequeños glóbulos.

Esta suspensión dispersa luz en ángulos diversos con respecto a la dirección del foco de luz y por ello polariza la luz dispersada. Con un filtro polarizador, el lector puede comprobar la polarización de la luz dispersada perpendicularmente al haz de luz. Si el haz de luz es horizontal, el filtro transmitirá luz dispersada con un sentido de polarización vertical. A medida que se van añadiendo más gotas de leche disminuye el grado de polarización en la luz dispersada.

Cuando el agua con leche es claramente blanca y desaparecen el rojo y el azul, la luz dispersada ya no se polariza. La densidad de los glóbulos de leche suspendidos es en esos momentos tan alta que la mayor parte de la luz dispersada lo ha sido de forma múltiple cuando llega al ojo. Lo mismo que ocurre con la dispersión atmosférica, la dispersión múltiple destruye la polarización.

Yo no he encontrado diferencia en los resultados obtenidos usando leche des-



Absorción de luz reflejada por un polarizador circular

cremada y leche sin descremar, a pesar de su diferente contenido en grasa. El lector quizá quiera probar con otras suspensiones coloidales, o con azúcar, para ver la diferencia entre una solución (en la cual la luz es dispersada por moléculas individuales) y una suspensión coloidal. Con unas cuantas gotas de leche en el agua se puede también demostrar un resultado del que he hablado anteriormente: la luz no se dispersa a lo largo de los ejes de polarización de la luz incidente. Esto se puede comprobar fijando un filtro polarizador al foco y examinando con otro filtro la luz dispersada perpendicularmente al haz de luz. Si el haz de luz del foco se polariza verticalmente, el ojo está recibiendo luz dispersada polarizada. Si el haz de luz es polarizado horizontalmente, el ojo está recibiendo luz no dispersada porque permanece en los ejes de polarización de la luz incidente.

El mes pasado vimos cómo se puede producir luz polarizada circularmente; se pasa la luz linealmente polarizada a través de una lámina de cuarto de onda colocada de tal forma que los ejes de la polarización estén a igual distancia entre el eje rápido de la lámina y el lento. En la longitud de onda para la cual la lámina es precisamente de un cuarto de onda aparece la luz polarizada circularmente. El sentido de rotación del vector de polarización que emerge depende de la orientación de la polarización incidente y de los dos ejes de la lámina. Convencionalmente se llama a la rotación "dextrógira" si tiene el sentido de las manecillas de un reloj según se mira hacia la fuente de luz y "levógira" si la rotación tiene el sentido contrario.

Si un polarizador circular concreto produce, por ejemplo, luz dextrógira, ésta puede también pasar a través del montaje en la dirección opuesta, aunque la luz emitida, finalmente, queda polarizada linealmente por el filtro. Si una luz polarizada levógira pasa a través de un polarizador circular dextrógiro, una vez que sale de la lámina de cuarto de onda, la luz es absorbida. Este efecto ha sido explotado para reducir el reflejo en las pantallas de televisión, osciloscopios, ventanas de aviones y en aquellos sitios donde el reflejo es molesto.

Así, se puede colocar delante de la pantalla de un televisor una placa polarizadora circular que se produce comercialmente. La placa es un conjunto de filtros polarizadores lineales pegados a 45 grados entre el eje rápido y lento de una lámina de cuarto de onda, con el filtro lineal en el exterior. La luz de la habitación que pasa a través de la lámina se polariza en el sentido dextrógiro; por ejemplo, cuando la luz se refleja en la pantalla de televisión, la reflexión convierte el sentido de polarización de la luz en luz levógira, pero la hoja absorbe ese sentido. Así, la luz de la habitación que de otra forma se habría reflejado en la pantalla interfiriendo la visión, es absorbida por la hoja circularmente polarizada.

Para demostrar este tipo de absorción, el lector puede construir un polarizador circular a partir de una lámina de cuarto de onda que describí el mes pasado. Coloque el polarizador en una moneda pequeña o cualquier otro objeto brillante. Si el polarizador lineal, que es parte del polarizador circular, está en el fondo del polarizador, la moneda brilla cuando es observada a través del montaje. Si el polarizador lineal está encima, la moneda es obscura, debido a la absorción de la luz reflejada. Si se quita el polarizador de encima de la moneda, ésta vuelve a ser brillante a medida que le da la luz sin tener que pasar a través del polarizador.

Si se cambia la moneda por una lámina lisa de aluminio y se repite el experimento, llegaremos a los mismos resultados. Podemos posteriormente hacerle a la lámina un pliegue en forma de *V* y poner el polarizador circular sobre la *V* con el filtro lineal hacia arriba. La parte lisa de la lámina se verá obscura otra vez, pero el pliegue estará brillante porque está actuando como un doble espejo.

Supongamos que un polarizador circular produce luz polarizada dextrógira, el componente de la luz que choque con un lado del pliegue se reflejará al otro lado antes de volver a aparecer, cambiando así su polarización de dextrógira a levógira; después volverá a ser dextrógira antes de llegar al polarizador otra vez. Su regreso a luz polarizada dextrógira quiere decir que pasa a través del polarizador circular sin absorción, mostrando, por tanto, una *V* brillante.

El lector puede continuar haciendo investigaciones con su polarizador circular haciendo uso de las láminas de cuarto y media onda. Si la luz polarizada circular levógira pasa a través de una lámina de media onda, el observador podrá ver luz polarizada dextrógira. Si es, en cambio, pasada a través de una lámina de cuarto de onda, verá luz polarizada linealmente. Quizá le interese repetir la demostración de absorción con un reflector colocando una lámina de media onda entre el polarizador circular y el reflector. ¿Absorbe todavía el polarizador circular la luz reflejada?

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

TEORIAS UNIFICADAS DE LAS INTERACCIONES FUNDAMENTALES

HISTORY OF WESTERN PHILOSOPHY. Bertrand Russell.

A SHORT HISTORY OF SOME DISCOVERIES IN ATOMIC PHYSICS. C. N. Yang en *Elementary Particles.*

ELECTRON-POSITRON ANNIHILATION AND THE NEW PARTICLES. S. D. Drell en *Scientific American,* pág. 50; junio, 1975.

EL CONFINAMIENTO DE LOS QUARKS. Y. Nambu en *Investigación y Ciencia,* pág. 52; enero, 1977.

LA CUESTION DEL DIOXIDO DE CARBONO

BROOKHAVEN SYMPOSIA IN BIOLOGY NO. 24: CARBON AND THE BIOSPHERE. Dirigido por George M. Woodwell y E. V. Pecan. U.S. Atomic Energy Commission, Division of Technical Information, Oak Ridge, Tenn., 1973.

PRIMARY PRODUCTION OF INLAND AQUATIC ECOSYSTEMS. Gene E. Likens en *Primary Productivity of the Biosphere,* dirigido por H. Lieth y Robert H. Whittaker. Springer-Verlag, 1975.

LA SUSTITUCION QUIRURGICA DE LA ARTICULACION DE LA RODILLA

POLYCENTRIC KNEE ARTHROPLASTY: PROSTHETIC SIMULATION OF NORMAL KNEE MOVEMENT. Frank H. Gunston en *The Journal of Bone and Joint Surgery,* vol. 53-B. págs. 272-277; mayo, 1971.

GEOMETRIC TOTAL KNEE ARTHROPLASTY, I: CONCEPTION, DESIGN, INDICATIONS, AND SURGICAL TECHNIC. Mark B. Coventry, Jackson E. Upshaw, Lee H. Riley, Gerald A. M. Finerman y Roderick H. Turner en *Clinical Orthopaedics and Related Research,* n.º 94. págs. 171-176; julio-agosto, 1973.

THE SPHEROCENTRIC KNEE: BIOMECHANICAL TESTING AND CLINICAL TRIAL. David A. Sonstegard, Herbert Kaufer y Larry S. Matthews en *The Journal of Bone and Joint Surgery,* vol. 59-A, págs. 602-616; julio, 1977.

LA ESTRUCTURA TRIDIMENSIONAL DEL ARN DE TRANSFERENCIA

THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF TRANSFER RNA. Sung Hou Kim en *Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology,* vol. 17, págs. 181-216; 1976.

TRANSFER RNA: MOLECULAR STRUCTURE, SEQUENCE, AND PROPERTIES. Alexander Rich y Uttam L. RajBhandary en *Annual Review of Biochemistry,* vol. 45, págs. 805-860; 1976.

LA ESTRUCTURA DEL MEDIO INTERESTELAR

THE EVOLUTION OF SUPERNOVA REMNANTS, I: SPHERICALLY SYMMETRIC MODELS. Roger A. Chevalier en *The Astrophysical Journal,* vol. 188, n.º 3. parte 1.ª, págs. 501-516; 15 de marzo de 1974.

SOFT X-RAY EMISSION IN ERIDANUS: AN OLD SUPERNOVA REMNANT? S. Naranon, S. Shulman. H. Friedman y G. Fritz en *The Astrophysical Journal,* vol. 208, n.º 3. parte 1.ª, págs. 718-726; 15 de septiembre de 1976.

EL MECANISMO DE ADHERENCIA EN LAS BACTERIAS

STRUCTURE AND FUNCTION OF THE CELL ENVELOPE OF GRAM-NEGATIVE BACTERIA. J. W. Costerton, J. M. Ingram y K.-J. Cheng en *Bacteriological Reviews,* vol. 38. n.º 1, págs. 87-110; marzo, 1974.

DENTAL CARIES. R. J. Gibbons y J. van Houte en *Annual Review of Medicine: Selected Topics in the Clinical Sciences,* vol. 26, págs. 121-136; 1975.

FINE STRUCTURE AND DISTRIBUTION OF EXTRACELLULAR POLYMER SURROUNDING SELECTED AEROBIC BACTERIA. Gerald D. Cagle en *Canadian Journal of Microbiology,* vol. 21, n.º 3, págs. 395-408; marzo, 1975.

LA EFICIENCIA DE LOS ALGORITMOS

ON COMPUTABLE NUMBERS, WITH AN APPLICATION TO THE ENTSCHEIDUNGSPROBLEM. Alan M. Turing en *Proceedings of the London Mathematical Society,* Series 2, vol. 42, partes 3.ª y 4.ª, págs. 230-265; noviembre/diciembre, 1936.

THE COMPLEXITY OF THEOREM-PROVING PROCEDURES. Stephen A. Cook en *Proceedings of the Third Annual AMC Symposium on Theory of Computing,* págs. 151-178; 1971.

REDUCIBILITY AMONG COMBINATORIAL PROBLEMS. Richard M. Karp en *Complexity of Computer Computations,* dirigido por Raymond E. Miller y James W. Thatcher. Plenum Press, 1972.

TOWARDS FEASIBLE SOLUTIONS OF THE TAUTOLOGY PROBLEM. Bradford Dunham y Hao Wang en *Annals of Mathematical Logic,* vol. 10, n.º 2, págs. 117-154; diciembre, 1976.

LA CARTAGO ROMANA

EXCAVATIONS AT CARTHAGE CONDUCTED BY THE UNIVERSITY OF MICHIGAN, 1975: I. Dirigido por John H. Humphrey. Tunisian National Institute of Archaeology and Art, 1976.

CARTHAGE 1977: THE PUNIC AND ROMAN HARBORS. L. Stager en *Archaeology,* vol. 30, págs. 198-200; 1977.

EXCAVATIONS AT CARTHAGE, 1975: SECOND INTERIM REPORT. Henry Hurst en *Antiquaries Journal,* vol. 56, parte 2.ª,págs. 177-197; 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

100 PUZZLES: HOW TO MAKE AND SOLVE THEM. Anthony S. Filipiak. A. S. Barnes and Co., Inc., 1942.

LA SCULPTURE DE BERROCAL. Giuseppe Marchiori. La Connaissance Bruxelles, 1973.

TALLER Y LABORATORIO

A SIMPLE DEVICE FOR OBSERVING THE POLARIZATION OF LIGHT FROM THE SKY. Ulf Halldén en *Nature,* vol. 182. n.º 4631, pág. 333; 2 de agosto de 1958.

HOW BEES NAVIGATE. Allan W. Snyder y Colin Pask en *Nature,* vol. 239, n.º 5366, págs. 48-50; 1 de septiembre de 1972.

ESTIMATING THE SIZE RANGE OF SMOG AEROSOL PARTICLES WITH A PAIR OF SUNGLASSES. W. H. White en *Atmospheric Environment,* vol. 9, n.º 11, págs. 1036-1037; 1975.

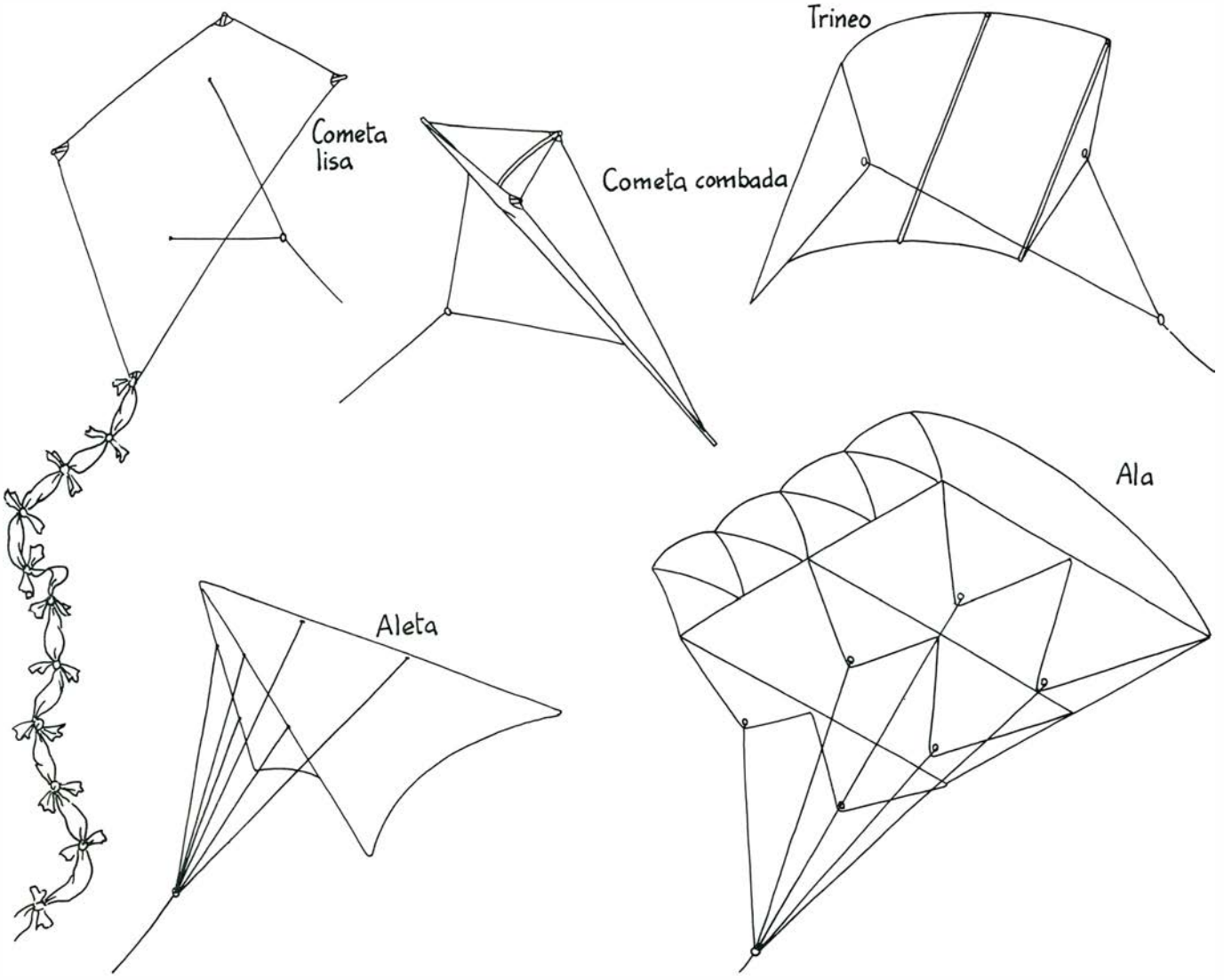
Taller y laboratorio

Presentación de las cometas Musha, de doble rombo y otras para construir y hacer volar

Jearl Walker

La primavera ha venido y con ella han llegado los vientos moderados, ideales para hacer volar cometas. La construcción de las mismas ha sufrido una pequeña revolución –al menos en el campo del aficionado– gracias a la introducción de nuevos materiales y herramientas que permiten construir cometas más resistentes y duraderas. A pesar de ello, tanto la técnica de la construcción como la del vuelo de cometas se encuentran aún en un estadio bastante experimental. No existe una ecuación simple por la que se pueda determinar taxativamente el ascenso y la estabilidad de una cometa: la fluidodinámica de la corriente de aire en la que se mueve la cometa es demasiado complicada como para tener solución, a menos que uno se meta a fondo en estudios muy sofisticados de aerodinámica. No se puede estudiar el tema de las cometas como si se tratara de un avión y hacerse incluso un modelo a escala reducida para ensayar en un túnel aerodinámico, donde determinar qué modelo de cometa será la que se eleve y permanezca estable. En el mundo del aficionado no hay más túnel aerodinámico que el propio viento de la naturaleza. Por ello, sin tener en cuenta que se esté construyendo un modelo patentado de un diseño básico u otro inventado por uno mismo, sólo hay un camino para saber si la cometa está bien hecha: que vuele.

El difunto C. L. Stong escribió una

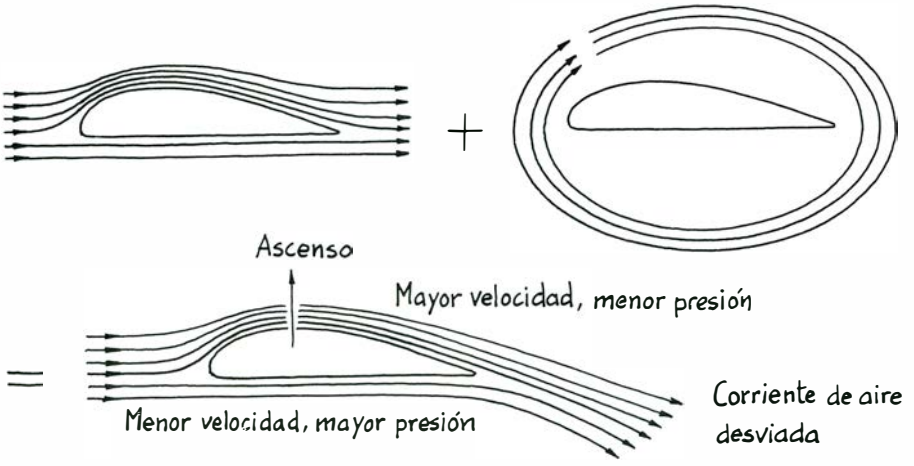


Cinco tipos de cometa

excelente introducción al tema de las cometas que se publicó en esta misma sección en abril de 1977. Recientemente se han editado varios libros buenos sobre las cometas donde se describen, con los diversos diseños, los nuevos materiales que se pueden emplear. Aquí expondremos la aerodinámica de la forma y del vuelo de las cometas, así como también unos cuantos modelos que no son difíciles de construir. Debido a la variada e interesante información que de ellos he recibido, estoy en deuda con Peter Pruden, de Cleveland, y con Judy Neuger. Las cometas, al igual que los diversos materiales para construirlas, pueden comprarse en las tiendas de artículos deportivos. Si conoce el inglés, puede confeccionarse una lista de las principales firmas expendedoras, que se anuncian en "Kite Lines", revista trimestral de la American Kitefliers Association, a la que se puede uno suscribir por 6 dólares al año (7106 Campfield Road, Baltimore, Md. 21207). Dicha publicación es buena tanto para los que se quieren iniciar en la técnica de fabricar y hacer volar las cometas, como para los que ya poseen gran experiencia en dicho campo.

La cometa no es una cosa divertida, a menos que pueda elevarse en el aire y lograr mantenerla allí estable o, por lo menos, controlada. La elevación que provoca la corriente de aire se debe a dos motivos: el primero es que la desviación que sufre dicha corriente al chocar contra la superficie de la cometa que se encuentra formando un determinado ángulo con la horizontal, empuja la cometa hacia arriba. La magnitud del impulso depende de la velocidad de la corriente de aire, es decir, del viento y del área de la proyección de la superficie de la cometa sobre el plano perpendicular a la dirección de dicha corriente de aire. Incrementando cualquiera de dichos factores, se aumenta el ascenso de la cometa. Sin embargo, cuando la desviación del viento es muy grande, la cometa presentará muchas dificultades para su manejo y puede llegar incluso a romperse. Si la velocidad del viento es muy grande, debe procurarse que el ángulo que forme la superficie de la cometa con la horizontal sea muy pequeño. En parte, la cometa autorregulará dicho ángulo y, en parte, se la debe ayudar regulando con las bridas o frenos que unen la cometa con la cuerda de amarre que sujeta a la misma.

El otro motivo que hace que la cometa se eleve es el mismo que hace subir a cualquier superficie flotadora. El movimiento de la corriente de aire que rodea la cometa puede considerarse como si tuviera dos componentes, uno dando vueltas alrededor de la cometa y otro no rotativo. En realidad, el movimiento de la corriente de aire, por lo menos de forma simple, se puede explicar como una superposición de los dos, con lo que resulta que la velocidad del aire es mayor por la parte de arriba de la superficie que por la de abajo. Esto provoca una diferencia de presión (a mayor velocidad menor presión) que hace que la superficie se eleve. Una cometa gana altura por el mismo sistema, aunque la aplicación del modelo simplificado de la corriente de aire puede no ser tan evidente.



Un modelo simple de líneas de corriente para un ala

Las inestabilidades de una corriente pueden ser de tres tipos: giros, cabeceos o desvíos. El giro es una rotación longitudinal, el cabeceo es una rotación lateral y la desviación es una rotación alrededor de un eje perpendicular a la superficie de la cometa. Para estabilizar el vuelo de una cometa, se pueden introducir varios trucos en su diseño. Además de una estructura equilibrada y de unas bridas apropiadas, está la cola, la cual puede tener forma curvada, de caja o bien aletas ya sea en la cara que dé al viento o en la posterior y abertura.

El armazón de la cometa debe estar perfectamente equilibrado para así conseguir un reparto simétrico del peso en toda la superficie de la misma que esté encarada con el viento. Si uno de los lados de la cometa pesa más que el otro, es casi seguro que el vuelo será enredado.

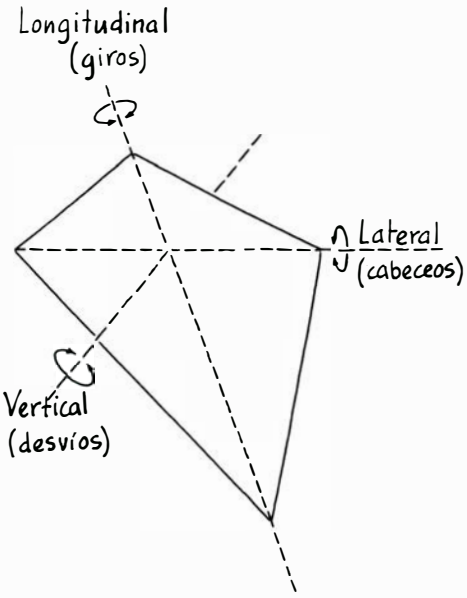
La brida es el conjunto de cuerdas que van desde la cometa hasta la cuerda de amarre. Algunas veces (aunque muy raramente) dicha brida es una cuerda simple (la cuerda de amarre de la cometa), en cuyo caso la definición es académica. Normalmente la brida consta de dos o más cuerdas atadas, por un extremo, a los puntos estratégicos de la cometa y, por el otro, unidas por un nudo común o por una pequeña argolla a la cuerda de amarre de la cometa. La función de la brida es distribuir la tensión de la presión del aire lo más posible, para dar estabilidad (bajo diversas circunstancias) y permitir, al que está dando vuelo a la cometa, maniobrar sobre ella.

La tracción combinada del conjunto de las cuerdas de la brida suministra una fuerza que contrarresta la resultante de las otras dos fuerzas que actúan sobre la cometa, que son, por un lado, su propio peso actuando hacia abajo y, por otro, la fuerza creada por la corriente de aire que actúa sobre la cometa en dirección ascendente, elevándola y haciéndola flotar graciosamente. Otra función de la brida es mantener a la cometa con un ángulo de ataque apropiado; dicho ángulo es el que forma la superficie de la cometa con la dirección del viento. En alguna ocasión, sobre todo con vientos fuertes, puede suceder que el ángulo de ataque de la cometa no sea el correcto. En este caso, la única solución es hacer bajar hasta el suelo la cometa para modificarla y ajustarle la brida. Algunas bridas tienen en la parte inferior de la cuerda un pequeño muelle o una banda de goma elástica, de manera que, cuando la velocidad del viento aumenta, el ángulo de ataque se ajusta automáticamente debido a que la misma presión del viento alarga la longitud del muelle o de la goma.

La cola suministra una estabilidad lateral y es necesaria en la mayoría de las cometas planas. Esta no debe ser ni demasiado larga ni demasiado corta; la longitud correcta sólo puede determinarse de forma experimental. Al añadirle

este lastre extra (básicamente como si fuera una prolongación del larguero) que es la cola, ésta responderá a los movimientos laterales de la cometa tirando de ella en dirección opuesta y, por tanto, anulando las oscilaciones laterales. La cola puede hacerse con trozos de tela unidos con una tira de papel o de plástico, o bien con un vasito o con varios vasitos dispuestos de manera que actúen como una chimenea haciendo pasar el viento a su través.

En el artículo de Stong mencionado se describía cómo usar los vasitos, a los que llama conos de viento. Fueron empleados por primera vez, como elementos estabilizadores del vuelo de las cometas, en el siglo XIX. Si los vasos se atan con la abertura estrecha hacia atrás, hacen pasar el viento hacia la abertura más pequeña, obligándole a aumentar su velocidad. La corriente de aire a la salida de esta especie de embudo tiene una velocidad mayor que el aire que lo rodea, lo que ayuda a mantener la orientación de los conos de viento. Algunas cometas tienen borlas laterales o bien dos colas en los extremos de la cruceta, en lugar de una sola cola, para conseguir una estabilidad longitudinal. Una gran parte de la estabilidad puede conseguirse por la forma de la cometa. Algunas cometas presentan al viento una superficie bien en forma de ángulo agudo o bien en forma de ángulo obtuso, al que se llama ángulo diedro. La cometa arqueada de Eddy, utilizada por primera vez por W. A. Eddy en 1897, es un ejemplo clásico de una cometa normal plana que ha sido arqueada hacia atrás para presentar al viento una superficie curvada. La estabilidad frente a las ráfagas de viento es proporcionada por el encorvamiento. Cuando la cometa se voltea ante una ráfaga repentina sobre una de las caras, la otra gira para presentar una mayor superficie al viento y de ese modo se ve sometida a una fuerza mayor, la cual evita que la cometa siga girando. La cometa de Eddy es tan estable a las ráfagas de viento que no necesita cola. Normalmente, la amplitud o magnitud del encorvamiento es ajustable, de suerte que se pueda lograr una mayor curvatura conforme aumente la velocidad del viento.



Tres inestabilidades

Otros modelos de cometas emplean aletas sobre la cara frontal o sobre la de detrás para mantener la cometa estable a las ráfagas de viento. Y hay modelos que tienen aberturas para dejar pasar el viento a su través sin impedimentos. Tales aberturas tienen varias funciones: reducir los tirones o arrastres de la cometa y, como consecuencia, el esfuerzo que tendría que soportar la persona que estuviera volando la cometa. También pueden ayudar a eliminar los remolinos provocados por el aire al pasar por los bordes de la cometa.

Tal vez el lector haya reparado alguna vez en la paradójica abertura de la mayoría de los paracaídas. Estos tienen un solo agujero en el centro. Los paracaídas empleados para detener lentamente los coches de carreras y para frenar el aterrizaje de los aviones poseen a veces unas aberturas de tanta superficie que parecen realmente dos bandas de tela cruzadas. Con un paracaídas sin agujeros o aberturas, se provocan remolinos alternativamente en una y otra cara del mismo, conforme el aire pasa por sus bordes. La presión del aire en los remolinos es menor que la presión del aire ambiente, de manera que el paracaídas se encuentra sometido a diferentes y periódicos cambios de presión en sus caras opuestas. El paracaídas comienza a balancearse y este balanceo aumenta en amplitud de forma similar a como lo hace el balanceo de un niño por empujones sucesivos del columpio.

Las oscilaciones pueden ser desastrosas para la carga sujeta al paracaídas. El aire, al pasar a través de las aberturas, rompe los remolinos y reduce así las oscilaciones. Las aberturas practicadas en algunas cometas tienen la misma finalidad. En las cometas pueden ser o bien unos simples orificios rectangulares o circulares o bien más disimulados, como los conseguidos por medio de la estructura celular de una cometa de caja.

Se debe tener cuidado a la hora de elegir un lugar para hacer volar la cometa. El desvío ascendente del viento por el lado de barlovento de una colina puede ser beneficioso, pero no así la turbulencia que tiene lugar al otro lado. Por eso, es mejor hacer volar la cometa al pie de la colina a barlovento y no en la cima de la misma. Un terreno con relativa vegetación, como por ejemplo un parque, puede dar lugar a corrientes de aire caliente ascendente que ayuden a la cometa a elevarse. Una vez que ésta se halla en el aire, puede apoyarse en vientos más fuertes a mayor altura. No debe echarse a volar nunca una cometa cerca de, o sobre, una carretera, ya que su vuelo puede distraer la atención de los automovilistas. Está prohibido jugar con ellas en las proximidades de los aeropuertos. Tampoco debe hacerse volar una cometa utilizando hilo conductor como cuerda de amarre, e incluso cuando use una cuerda nunca eche la cometa cerca de un tendido eléctrico ni cuando haya tormenta. Contrariamente a lo que mucha gente cree, Benjamin Franklin no llevó a cabo su famoso experimento durante una tormenta, sino cuando ésta se estaba aproximando. Incluso así, tuvo suerte de no morir electrocutado. En cualquier caso, aun cuando el viento sea una brisa suave, deben utilizarse guantes gruesos de los empleados para trabajar, así se podrá agarrar la cuerda sin riesgo de que ésta queme las manos. Por último, hay que tener cuidado con los árboles "tragacometas", ya que pueden estropear en un minuto el trabajo de horas.

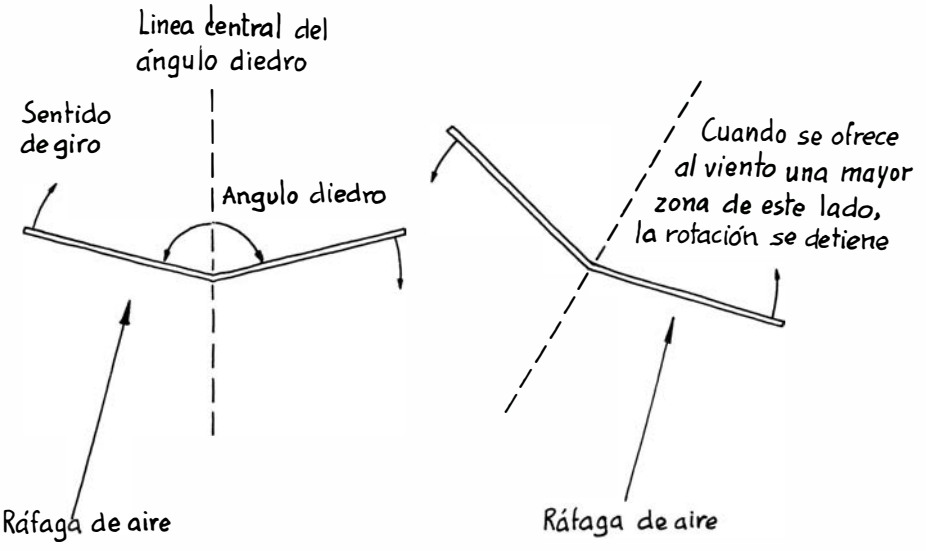
Para lanzar una cometa se debe mantener ésta con más o menos 20 grados de inclinación respecto a la vertical, en una posición aparentemente correcta de vuelo, dejándola suelta cuando pase una ráfaga de aire y dándole cuerda lentamente desliando el carrete. Se debe mantener tensa la cuerda, para que continúe el ascenso. Si la brisa es suave, se puede pedir ayuda a un amigo, el cual sujetará la cometa a unos 50 metros de la persona que tiene el carrete, manteniendo tensa la cuerda de amarre. Cuando pase una ráfaga de viento, el primero suelta la cometa lanzándola hacia arriba y el segundo va dando tirones ascendentes de la cuerda de amarre con una y otra mano. De esta forma, tirando y llevando la cometa en dirección contraria a la brisa, se consigue la elevación de la misma.

Si la cometa se agita y no sube, puede ser porque la brida está muy alta: habrá que bajarla. Si la cometa se mueve sin ton ni son y describe curvas continua-

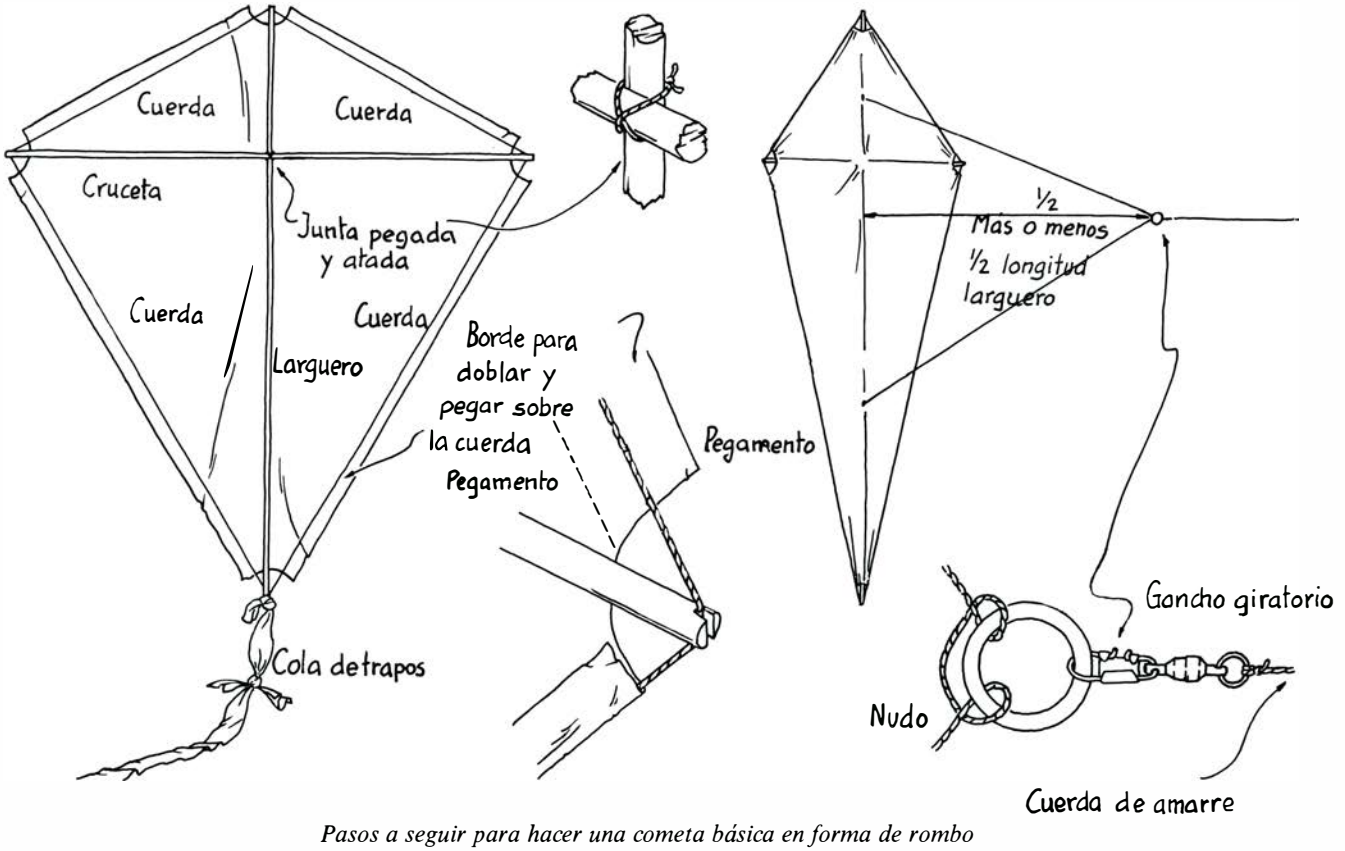
mente puede ser porque esté demasiado baja y habrá que subirla. Cuando una cometa lisa o arqueada sube hasta muy arriba, ya no presenta ninguna sección opuesta al viento y, por tanto, pierde altura. A medida que va cayendo (parcialmente vocada) presenta un ángulo de ataque negativo, pero puede autocorregirse después de que ha descendido lo suficiente. Si la cometa está alta, puede resultar divertido ver cómo cae describiendo curvas. Si está baja, puede estrellarse contra el suelo al final de la curva.

Para hacer descender a la cometa, el lector probablemente enrollaría la cuerda de amarre en el carrete, pero cuando la brisa es algo fuerte esta labor puede hacerse muy difícil o imposible. Otra alternativa podría ser darse un paseo a lo largo de la cuerda de la siguiente forma: ate el extremo de la cuerda a un objeto fijo o déselo a un amigo para que lo sujete. Después, hay que moverse en dirección a la cometa tirando de la cuerda hacia abajo con ambas manos. Una vez que la cometa ha descendido hasta las zonas de brisa más ligera próxima al suelo, el rebobinado es más fácil.

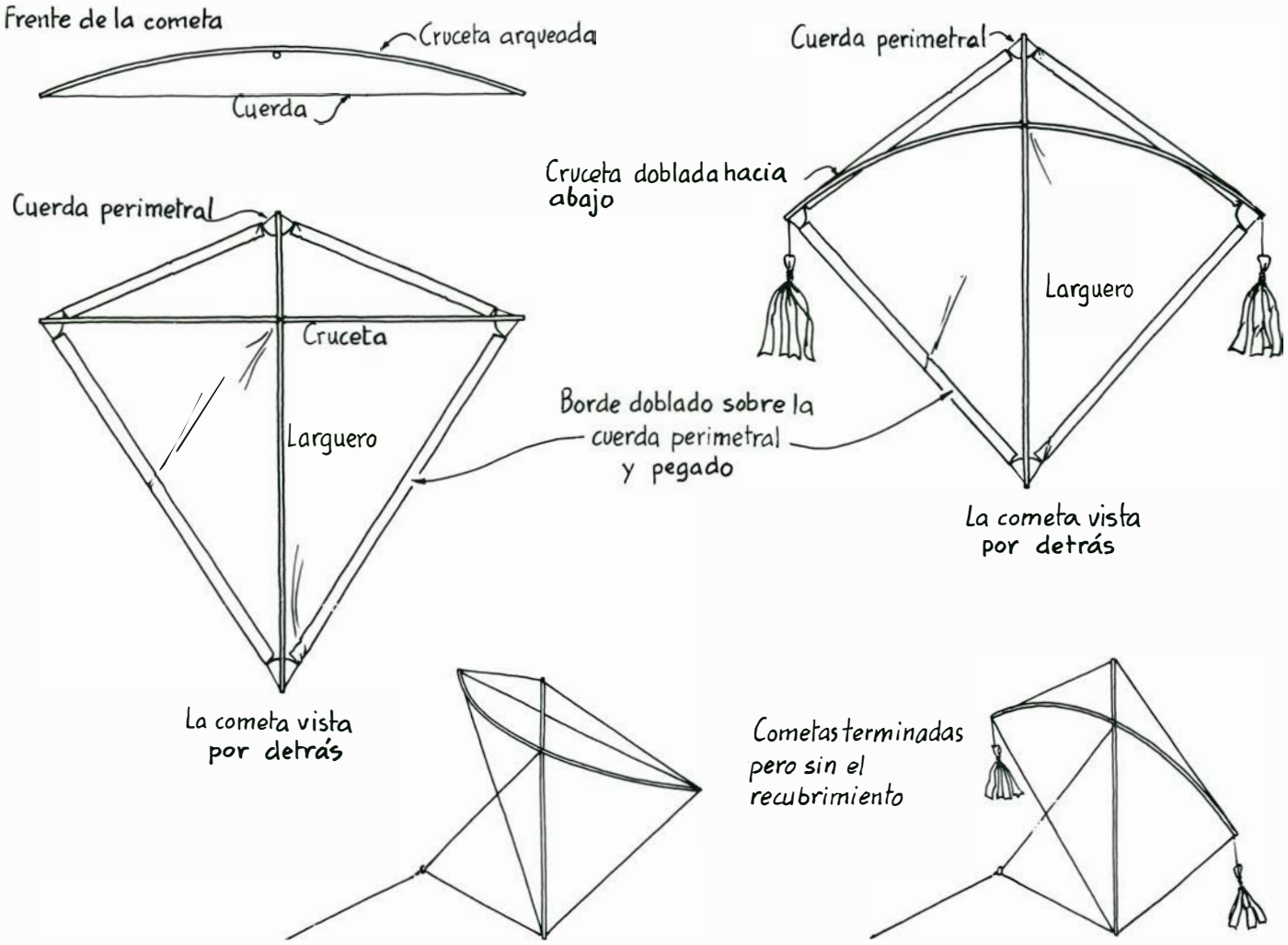
Para construir una cometa se debe decidir primero qué materiales se van a usar para las dos partes básicas de la misma: el armazón y la cubierta. En Oriente, el armazón se ha venido haciendo tradicionalmente con caña de bambú abierta por la mitad. Las cañas resultan ligeras y fuertes y pueden doblarse sin demasiado trabajo. En Occidente suelen emplearse ramas de pino. Actualmente se pueden usar tubos de fibra de vidrio o de aluminio, que son más fuertes, si bien cuesta manejarlos y, además, resultan caros (para cortar la fibra de vidrio puede ser necesaria una mascarilla, ya que es peligroso respirar el aire que pueda contener partículas de este producto). Los tubos de fibra de vidrio y de aluminio deben conectarse entre sí con algún tipo de tubería de plástico, ligeramente más ancha. Por todo esto, y a no ser que el lector sea ya un experto constructor de cometas, yo le aconsejaría que trabajara con palos de madera de unas medidas aproximadas de 14 a 19 cm de largo por 5-6 mm de diámetro. Las tiras rectangulares que van colocadas en forma de cruz con el eje principal deberán tener



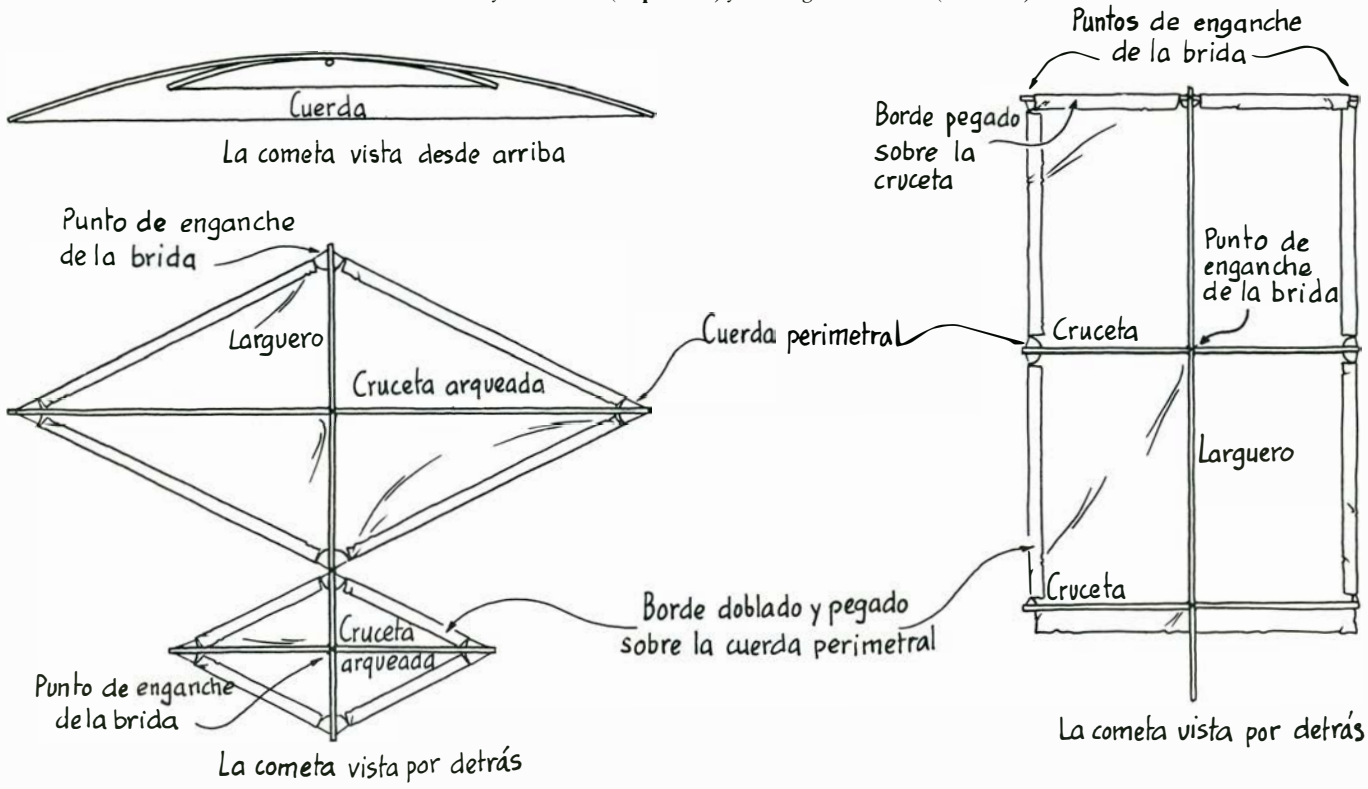
Vista del ángulo diedro desde arriba



Pasos a seguir para hacer una cometa básica en forma de rombo



La cometa Eddy combada (**izquierda**) *y la Nagasaki Hata* (**derecha**)



La cometa de doble rombo (**izquierda**) *y la Musha* (**derecha**)

unas dimensiones aproximadas de 3-9 milímetros. El mejor tipo de madera parece ser el abeto, aunque también sirven otros tipos de árboles. Estos palos se pueden comprar baratos en cualquier carpintería o almacén de maderas. Antes de comprarlos debe comprobarse que están bien derechos y sin nudos.

El material tradicional para cubrir las cometas ha sido bien tela o papel fuerte de poco peso. La tela es fuerte y duradera, pero hay que coserla. Por su parte, el papel se rasga con mayor facilidad, pero tiene la ventaja de que se puede pegar al armazón de la cometa. Recientemente se ha hecho popular el plástico Mylar, que es fuerte, relativamente barato, ligero y puede fijarse con cinta adhesiva. El plástico Mylar se puede adquirir en tiendas de cometas y en algunas ferreterías. Otros materiales modernos son el Zephyrlite y el Stabilkote, que pueden ser fijados o bien cosiéndolos o pegándolos con cinta adhesiva. Ambos son ligeros, fuertes y con buena resistencia al desgarramiento.

Personalmente creo que el mejor material que se puede usar es Tyvek, una fibra sintética de la firma Du Pont. Puede parecer tela o papel, dependiendo del tipo que se compre, pero de cualquier manera es casi imposible romperlo con la mano. Tiene todas las ventajas del papel, es bastante barato, se puede fijar al armazón con pegamento en pocos minutos, se puede pintar con pintura corriente o con rotulador, pero el hecho de que no se desgarre con facilidad le hace superior al papel. También pueden usarse otros materiales de recubrimiento tales como lona de vela (a veces se pueden adquirir restos de algún fabricante local de barcos), nylon no desgarrable, etcétera. Hay algunos materiales de uso doméstico que también son apropiados: papel de envolver, bolsas de papel marrón y bolsas de plástico del tipo de las que se usan para la basura.

La cuerda de amarre de la cometa puede ser la corriente de algodón, pero la de nylon es más ligera y resistente. Una limitación a la altura máxima que puede alcanzar una cometa es el peso de la cuerda de amarre que debe soportar; por tanto, es más conveniente ponerle una cuerda que tenga una alta relación resistencia-peso. El punto de rotura de la cuerda de amarre debe ser lo suficientemente elevado como para evitar que se pierda la cometa al primer intento de vuelo. Wyatt Brummitt, en "Kite Lines", da una regla sobre la fuerza que debe ser capaz de soportar: el punto de rotura (expresado en libras de peso) debe ser equivalente a, por lo menos, tres veces el total del área frontal de la cometa (expresado en pies cuadrados: 1 pie es igual a 0,304 metros). El carrete en el que se enrolla la cuerda de amarre puede ser simplemente un trozo de caña, que es lo que yo uso, o cualquier carrete convencional de los útiles de pesca. Algunos aficionados a las cometas las hacen volar saliendo el hilo de una caña de pescar, lo cual ofrece una imagen curiosa a los transeúntes.

Existen otros materiales que pueden hacer más fácil la construcción de una cometa. Si se emplean bastones, éstos pueden pegarse después de que han sido colocados y atados con cuerdas. Normalmente se ha venido usando pegamento blanco para fijarlos, pero recientemente los aficionados a las cometas prefieren comprar pistolas de cola caliente. El pegamento blanco puede tardar hasta una hora en secarse, mientras que la cola de la pistola necesita sólo dos minutos. Las pistolas hacen la construcción más fácil y facilitan también el trabajo de reparación en los armazones rotos. Si el lector quiere usar una pistola de cola, le recomendaría que tuviera al lado un recipiente con agua porque puede caerle cola caliente en la piel, y la única manera de evitar una quemadura seria es sumergir rápidamente la zona afectada en agua. Otros dos instrumentos de trabajo convenientes son: una hoja de sierra de las que se usan para cortar madera, un punzón y ojetes metálicos para hacer agujeros en los materiales y protegerlos con los ojetes.

La brida puede acabar en una pequeña lazada a la cual se ata la cuerda de amarre de la cometa, pero si ésta gira con viento moderado, el freno se torcerá. Para evitar este problema, se puede ajustar la brida a un pequeño anillo de metal o de plástico con un nudo y después añadirle un enganche del tipo de los que se usan para las cañas de pescar, entre el anillo y la cuerda de amarre de la cometa. Este enganche se puede comprar en una tienda de deportes.

Ahora, construyamos una o dos cometas. Describiré aquí algunos diseños básicos de las mismas. Existen otros muchos que sería muy interesante construir debido a su distinta aerodinámica. Quizá me ocupe de alguno de los otros diseños en un futuro artículo para esta misma sección.

Todas las ilustraciones de los diseños de los que hablaré están trazadas a la misma escala en pulgadas (una pulgada equivale a 25,4 mm); ésta aparece en el lado izquierdo de la ilustración inferior

de la página 111. Para medir la longitud de cualquier palo o el lado de una cometa, sólo hay que marcar la longitud que tiene en la ilustración en una hoja de papel, y colocar después el borde del mismo sobre la escala. Si el lector deseara hacer una cometa mayor o menor que la del plano, deberá medir primero las dimensiones de mi cometa y después incrementarlas o reducirlas proporcionalmente. Tenga presente, si desea hacer una cometa grande, que ésta tendrá que salir por la puerta de su casa.

El primer diseño es una cometa en forma de rombo, con una cruceta (palo horizontal) perpendicular a un larguero (palo vertical) y que se cruzan a una distancia de aproximadamente un cuarto de la medida del larguero. Los palos se cortarán a la medida adecuada con una sierra, dejando los bordes suaves; después se marcarán los puntos de intersección para el cruce de los dos palos; teniendo cuidado de que el punto esté exactamente en la mitad de la cruceta. Los dos palos pueden unirse por medio de un toque de cola caliente con la pistola. Después de unos minutos se pueden atar con un hilo fuerte (como el de pescar, por ejemplo), y se puede aplicar más cola si se desea. La unión de estos palos se puede hacer aplicando primero la cola y recubriendo luego la junta con una capa de papel adhesivo o al contrario, para conseguir una mayor fijeza. Se debe tener mucho cuidado de que los palos se hallen exactamente perpendiculares el uno respecto del otro.

Antes de montar los palos, se deben hacer unas pequeñas entalladuras en los extremos con una hoja de sierra. En uno de los extremos se atará la punta de una cuerda y se pasará ésta a lo largo de la muesca, y después se va haciendo lo mismo en las otras muescas hasta que la cuerda describa el rombo básico de la cometa. Compruebe por medio de una inspección visual el equilibrio de la cometa. También puede hacerlo haciendo pasar una aguja a través de la junta de la cruceta y el larguero, y viendo si el marco de la cometa cuelga recto de la aguja. Si está claramente desequilibrado, habrá que ajustar los palos y la cuerda.

Coloque el armazón sobre el material que piense usar para cubrir la cometa. Corte éste con la forma del armazón, dejando un poco más en los bordes para doblarlo sobre las líneas exteriores y unirlo por dentro del rombo. Si el material es papel o Tyvek, este borde se puede unir con pegamento, si es tela habrá que coserlo y, si es Mylar, pegarlo con cinta adhesiva. Póngale una brida de dos patas al larguero. Haga una cola de tela de seis pulgadas de longitud atada a una pieza estrecha de tela, la cual será unas 5 veces más larga que el larguero.

La cometa de Eddy se hace más o menos de la misma forma, con la excepción de que no necesita cola y que la cruceta se dobla hacia atrás después de haber puesto la cubierta en el armazón. Para ello, coloque una punta de la cruceta en el suelo y dóblelo de manera que la cubierta esté en el exterior de la curva. Ponga una cuerda desde un extremo al otro del larguero para mantenerlo doblado. Las cuerdas de la brida se pasan a través de pequeños agujeros abiertos en la cubierta y se unen al larguero por los puntos indicados en la ilustración de la página 112, arriba a la izquierda. La forma cóncava proporciona el ángulo diedro necesario para la estabilidad de la cometa. Esta cometa funciona bien con vientos ligeros y moderados.

El siguiente paso para hacer un tercer tipo de cometa, la Nagasaki Hata, consiste en poner la cruceta y el larguero formando cuatro ángulos rectos después de asegurarse de que están equilibrados. Se ata bien el punto de unión, se dobla la cruceta hacia abajo y, manteniéndolo así, se fija la cubierta. Esta se une al larguero y se añade una borla a cada extremo de la cruceta. Las borlas pueden ser de cintas, del tipo de las que se usan para los paquetes de Navidad. Asegúrese de que la cometa está equilibrada, ajustando bien las borlas. Si éstas se hallan bien puestas, ayudan a estabilizar la cometa de la misma forma que lo hace una cola. La cruceta doblada es empujada hacia atrás por el viento, produciendo una cara curvada similar a la de la cometa de Eddy, sólo que, con este diseño, la medida de la curva está obviamente determinada por la fuerza del viento.

El cuarto tipo de cometa, la de doble rombo, es parecida a la de Eddy, con excepción de que se inserta un rombo más pequeño debajo del principal. Los dos rombos se construyen con el mismo larguero y se doblan hacia atrás. El rombo pequeño actúa de timón para estabilizar la cometa, la cual puede volar con vientos ligeros y moderados.

Muchas de las cometas orientales son rectangulares. La Musha es fácil de construir y tiene una característica aerodinámica muy interesante: el borde rastrero (en la cruceta inferior), el cual ayuda a estabilizar la cometa de forma muy parecida a como lo hace la cola. Esta cometa puede volar con vientos ligeros y suaves.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

YACIMIENTOS METALICOS EN LA LITOSFERA OCEANICA

METALLOGENESIS AT OCEANIC SPREADING CENTERS. Enrico Bonatti en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences,* vol. 3, págs. 401-431; 1975.

COOPER-IRON SULFIDE MINERALIZATIONS FROM THE EQUATORIAL MID-ATLANTIC RIDGE. Enrico Bonatti, Beatriz-Melba Guerstein-Honnorez y José Honnorez en *Economic Geology,* vol. 71, págs. 1515-1525; 1976.

METABOLISMO INTERMEDIARIO DURANTE EL EMBARAZO

THE PHYSIOLOGY OF HUMAN PREGNANCY. F. E. Hytten e I. Leitch. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 1971.

EARLY DIABETES IN EARLY LIFE. R. Camerini-Davalos y S. Cole. Academic Press. New York, 1975.

METABOLISMO DE LOS GLICERIDOS EN EL TEJIDO ADIPOSO. E. Herrera en *Investigación y Ciencia,* págs. 28-37; enero, 1977.

ENSAMBLAJE CONTROLADO POR ORDENADOR

ECONOMIC-TECHNOLOGICAL MODELING AND DESIGN CRITERIA FOR PROGRAMMABLE ASSEMBLY MACHINES: CSDL REPORT No. T-625. P. M. Lynch. Charles Stark Draper Laboratory, 1976.

A MULTIDIMENSIONAL SYSTEM ANALYSIS OF THE ASSEMBLY PROCESS AS PERFORMED BY A MANIPULATOR: CSDL REPORT NO. P-364. Paul C. Watson. Charles Stark Draper Laboratory, 1976.

MICROCIRCUITOS DEL SISTEMA NERVIOSO

ORGANIZATION OF THE PRIMATE RETINA: ELECTRON MICROSCOPY. John E. Dowling y Brian B. Boycott en *Proceedings of the Royal Society,* Serie B. vol. 166, págs. 80-111; 1966.

SYNAPTIC ORGANIZATION OF THE BRAIN. Gordon M. Shepherd. Oxford University Press, 1974.

LOCAL CIRCUIT NEURONS. Dirigido por Pasko Rakic en *Bulletin of the Neurosciences Research Program,* vol. 13, n.º 3, págs. 291-446; 1975.

ELECTRONIC PROCESSING OF INFORMATION BY BRAIN CELLS. Francis O. Schmitt, Parvati Dev y Barry H. Smith en *Science,* vol. 193, n.º 4248, págs. 114-120; 9 de julio de 1976.

PLANTAS CARNIVORAS

ENZYME RELEASE IN CARNIVOROUS PLANTS. Yolande Heslop-Harrison en *Lysosomes in Biology and Pathology: Vol. IV,* dirigido por J. T. Dingle y R. T. Dean. A.S.P. Biological and Medical Press, 1975.

THE CARNIVOROUS PLANTS. Francis Ernest Lloyd. Dover Publications, Inc., 1976.

COMPARATIVE SENSORY PHYSIOLOGY OF THE DROSERACEAE–THE EVOLUTION OF A PLANT SENSORY SYSTEM. Stephen E. Williams en *Proceedings of the American Philosophical Society,* vol. 120, n.º 3, págs. 187-204; 15 de junio de 1976.

LA GENETICA DEL CANCER HUMANO

SOMATIC CELL HYBRIDS BETWEEN MOUSE PERITONEAL MACROPHAGES AND SV40-TRANSFORMED HUMAN CELLS, I: POSITIVE CONTROL OF THE TRANSFORMED PHENOTYPE BY THE HUMAN CHROMOSOME 7 CARRYING THE SV40 GENOME. Carlo M. Croce e Hilary Koprowski en *The Journal of Experimental Medicine,* vol. 140, n.º 5, págs. 1221-1229; 1 de noviembre de 1974.

CLUSTERING OF ABERRATIONS TO SPECIFIC CHROMOSOMES IN HUMAN NEOPLASMS, II: A SURVEY OF 287 NEOPLASMS. Felix Mitelman y Göran Levan en *Hereditas,* vol. 82, n.º 2, págs. 167-174; 1976.

LOSS OF MOUSE CHROMOSOMES IN SOMATIC CELL HYBRIDS BETWEEN HT-1080 HUMAN FIBROSARCOMA CELLS AND MOUSE PERITONEAL MACROPHAGES. Carlo M. Croce en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 73, n.º 9, págs. 3248-3252; septiembre, 1976.

NEOPLASTIC TRANSFORMATION–MECHANISMS AND CONSEQUENCES: REPORT OF THE DAHLEM WORKSHOP ON NEOPLASTIC TRANSFORMATION, 1977. Dirigido por Hilary Koprowski. Berlín, 1977.

SUPERGRAVEDAD Y LA UNIFICACION DE LAS LEYES DE LA FISICA

PROGRESS TOWARD A THEORY OF SUPERGRAVITY. Daniel Z. Freedman, Peter van Nieuwenhuizen y Sergio Ferrara en *Physical Review D: Particles and Fields,* vol. 13, n.º 12, págs. 3214-3218; 15 de junio de 1976.

ONE-LOOP RENORMALIZABILITY OF PURE SUPERGRAVITY AND OF MAXWELL-EINSTEIN THEORY IN EXTENDED SUPERGRAVITY. Marcus T. Grisaru, Peter van Nieuwenhuizen y J. A. M. Vermaseren en *Physical Review Letters,* vol. 37, n.º 25, págs. 1662-1666; 20 de diciembre de 1976.

SISTEMAS DE REFRIGERACION PASIVA EN LA ARQUITECTURA IRANI

AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION. William H. Severns y Julian R. Fellows. John Wiley & Sons, Inc., 1958.

PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER. Frank Kreith. International Textbook Co., 1965.

JUEGOS MATEMATICOS

THE KRUSKAL PRINCIPLE. Martin Gardner y Karl Fulves en *The Pallbearers Review,* págs. 967, 970; junio, 1975.

A PROBLEM IN CHECKER-JUMPING. Ross Honsberger en *Mathematical Gems II.* The Mathematical Association of America, 1976.

APPROACHES AND USES OF THE "KRUSKAL KOUNT". Ed Marlo y Charles M. Hudson en *The Linking Ring,* vol. 56, n.º 12, págs. 82-87; diciembre, 1976.

TALLER Y LABORATORIO

KITES. Wyatt Brummitt. Golden Press, 1971.

KITE CRAFT. Lee S. Newman y Jay H. Newman. Crown Publishers, 1974.

THE PENGUIN BOOK OF KITES. David Pelham. Penguin Books, 1976.

Taller y laboratorio

Ilusiones ópticas que pueden producirse al colocar un filtro obscuro delante de uno de nuestros ojos

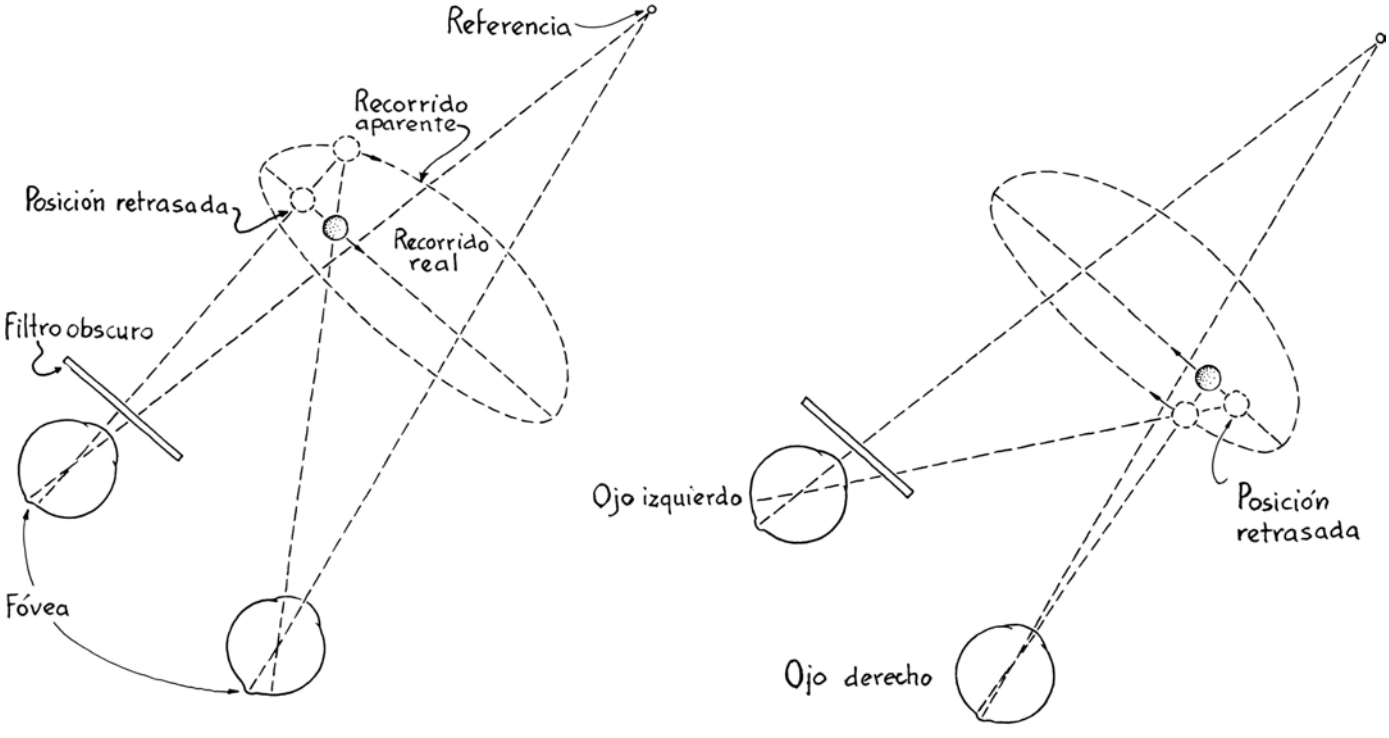
Jearl Walker

Bajo determinadas circunstancias, el movimiento oscilatorio de un péndulo que se mueva en un plano perpendicular a la línea de visión del observador puede dar la impresión de que dicho péndulo se mueve alrededor de un eje vertical central describiendo una elipse. El efecto fue explicado por primera vez en 1922 por el físico alemán Carl Pulfrich, y en su honor se reconoce desde entonces como "efecto Pulfrich". El lector puede hacer, sin dificultad, una demostración práctica de dicho efecto.

Para ello sólo necesita tres cosas: un péndulo simple, consistente en un peso colgado de una cuerda, un filtro óptico parcialmente obscurecido, como por ejemplo uno de los cristales de unas gafas de sol, y un objeto vertical, delgado. Haga oscilar el péndulo en un plano perpendicular al de su línea de visión, y sitúe el objeto alargado detrás del péndulo y en posición vertical. El filtro obscuro se colocará delante de uno de los ojos y se mirará con ambos al objeto del fondo. Parecerá que el péndulo se mueve elípticamente. Con el cristal enfrente del ojo izquierdo la rotación será en el sentido de las agujas del reloj visto desde arriba; con el filtro obscuro enfrente del ojo derecho, el movimiento será contrario al de las agujas del reloj. Cuanto más obscuro sea el filtro mayor será la profundidad aparente del recorrido elíptico del péndulo. De alguna manera el cristal obscuro provoca que el observador perciba un movimiento en profundidad, aunque no exista dicha profundidad.

Pulfrich explicó el efecto a raíz de una sugerencia que le hizo un compañero en el sentido de que tal vez el filtro obscuro retrasaba la velocidad con que la imagen que el ojo afectado recibía llegaba al cerebro. (Pulfrich era tuerto, y nunca podría haber visto tal ilusión.) La sugerencia del compañero resultó ser cierta. Cuando se disminuye la iluminación que recibe uno de nuestros ojos, la percepción de los objetos por dicho ojo está retrasada con respecto a la percepción del otro ojo en varios milisegundos (unas cuantas decenas).

Supongamos que el ojo izquierdo está tapado por un cristal obscuro y que el péndulo comienza a oscilar de izquierda a derecha. Los ojos estarán fijos en el objeto del fondo, de manera que la imagen del mismo caerá sobre la fóvea (pequeña depresión existente en la retina, que es por donde la visión es más aguda). En los comienzos de la oscilación, es decir, con el péndulo en su posición a la izquierda, la imagen del peso se formará fuera del centro de la fóvea, pero debido al retraso visual causado por el ojo izquierdo, la imagen del objeto en dicho ojo se formará bastante más desplazada todavía del centro de la fóvea. Por el ojo izquierdo, el observador verá el objeto donde estaba varias decenas de milisegundos antes, esto es, más a la izquierda de su verdadera posición. La imagen se forma en la retina más alejada del centro de la fóvea de lo que se hubiera formado si no estuviera el cristal. Lo que el observador percibe realmente es el ángulo entre el peso del péndulo y el objeto de referencia del fondo. El ángulo para el ojo izquierdo es mayor que para el ojo derecho y eso le hace percibir una diferencia que el observador interpreta como si el peso estuviera más



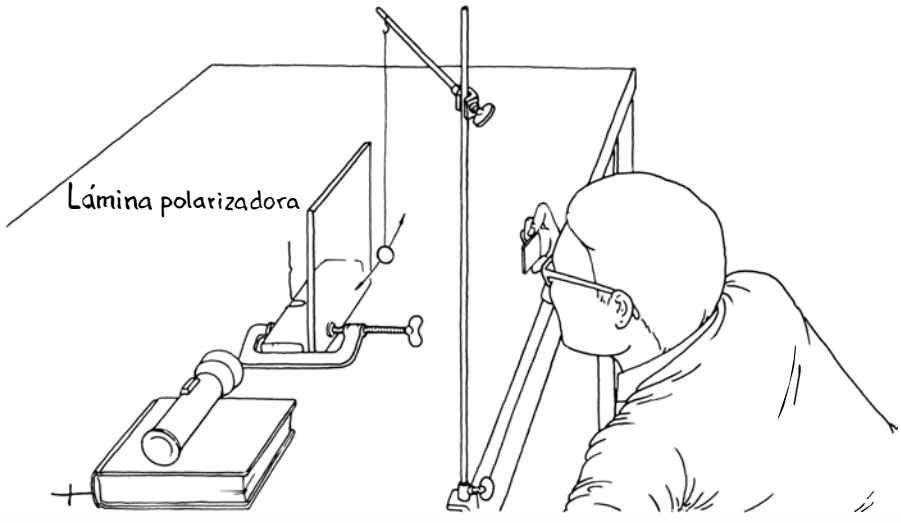
Movimiento aparente del peso del péndulo en el efecto Pulfrich

lejos de lo que realmente está. Por consiguiente, el retraso en la recepción de la imagen le da la impresión de profundidad en el movimiento del peso del péndulo.

Como la velocidad del peso se hace mayor conforme se aproxima a su centro de oscilación, la diferencia angular entre el peso y el objeto de referencia será mayor y, por tanto, la aparente profundidad del peso aumentará. Al contrario, como la velocidad del péndulo se hace menor conforme se aproxima al extremo derecho de la oscilación, la diferencia angular disminuirá y el peso parecerá que se mueve acercándose al observador. Durante el recorrido de regreso hacia la izquierda, el retraso en la percepción que provoca el ojo izquierdo hará que parezca que el peso se mueve en un punto más próximo al observador de lo que realmente está. Ese punto más próximo se hallará cerca del centro de oscilación del péndulo, donde la velocidad del peso es máxima. El movimiento que describe el peso en un ciclo completo es una rotación aparente a lo largo de una órbita elíptica alrededor de un eje vertical.

Al incrementar la obscuridad del filtro (su densidad óptica) aumenta el retraso en la percepción del ojo tapado y, como consecuencia, la profundidad del movimiento elíptico. Se puede controlar muy fácilmente la obscuridad del filtro usando como tal dos filtros polarizadores cruzados. Modificando el ángulo entre los sentidos de polarización de los filtros se puede seleccionar el grado de obscuridad deseado. Con suficiente obscuridad, la órbita llega a ser casi circular. Al ir intensificando la obscuridad llegará un momento en que el efecto se pierda debido a que sólo se verá el objeto a través del ojo descubierto. Entonces se percibirá el movimiento lineal como realmente es.

Los procesos físicos que provocan el retraso de la llegada de la señal óptica al cerebro no se conocen con suficiente detalle. El retraso se debe a la disminución de la intensidad de luz que llega a la retina o al cambio en la adaptación del ojo. Quizás influyan ambos factores a un tiempo. (El ojo se adapta a los cambios de la intensidad luminosa modificando el tamaño de la pupila y haciendo que una mayor o menor cantidad de pigmento intervengan en el proceso visual.) Un modelo con el que explicar el retraso en la visión puede ser un conjunto de cuatro circuitos eléctricos de retardo idénticos, cada uno de los cuales constaría de una resistencia, un condensador y un amplificador. Albert M. Prestrude, del Virginia Polytechnic Institute and State University, sugirió que las cuatro etapas podían corresponder a las cuatro capas de células (horizontal, bipolar, amacrina y ganglionar) en el recorrido visual, pero esta correlación no está del todo clara.



Montaje para conseguir la ilusión del péndulo

En la analogía, la sensibilidad del proceso visual (esto es, hasta qué punto con una pequeña señal de entrada puede producir una señal de salida suficiente) depende de los valores de la resistencia y de la ganancia de las unidades de amplificación. Aunque los valores de la resistencia no son fijos, pueden ser controlados por una señal de realimentación procedente de la señal que sale al final del sistema de visión. El tiempo de respuesta del sistema depende de los valores de la resistencia: a mayor resistencia, mayor tiempo de respuesta. El efecto combinado es que cuando el nivel de estímulo para el ojo decrece, la señal de realimentación procedente de la señal de salida en el proceso visual incrementa la resistencia y la ganancia del amplificador en cada etapa con el fin de aumentar la sensibilidad. El incremento de la resistencia, a su vez, significa que el sistema se tomará un mayor tiempo para responder. Por consiguiente, al disminuir la intensidad de iluminación en un ojo se obtiene una mayor sensibilidad y un mayor tiempo de respuesta.

Desde el trabajo de Pulfrich, el efecto ha sido estudiado en una gran variedad de aplicaciones. Algunos investigadores emplearon dos discos giratorios, uno para cada ojo. Mirando a través de un sistema de prismas y de lentes, un observador podría fundir las imágenes de los dos discos giratorios de manera que percibiera la imagen de un solo disco en rotación.

Cada disco tenía taladrada una línea radial. Si los dos discos giraban de forma sincronizada, el observador veía una sola línea. No obstante, colocando un filtro obscuro delante de uno de los ojos, se provocaba que desapareciera la sincronización de las líneas. Midiendo en cuánto había que modificar la fase entre los discos para que las líneas volvieran a aparecer sincronizadas en la rotación, el observador podía determinar el retraso que el filtro introducía.

Una técnica particularmente interesante fue utilizada por Bela Julesz, de los Bell Laboratories, y por Benjamin White, de la Universidad del estado de San Francisco. Mostraban a un observador películas de puntos aleatorios hechas con un ordenador en las cuales cada cuadro era estadísticamente independiente de los otros. A través de sistemas de visión independientes, cada ojo veía una película. En el centro de cada cuadro había puntos seleccionados al azar que formaban parte de un cuadrado.

Si sólo un ojo veía la película, la sensación de un cuadro central se perdía en el evidente maremágnum de puntos aleatoriamente distribuidos. Si cada ojo veía la película que le correspondía de manera simultánea, el cuadrado central se hacía visible y sobresalía del fondo de puntos distribuidos de forma fortuita. La sensación de estereoscopicidad era debida al ligero desfase de los puntos del ojo izquierdo en relación con los puntos vistos por el ojo derecho. La misma técnica se emplea en las películas convencionales en estereoscopio, en las cua-

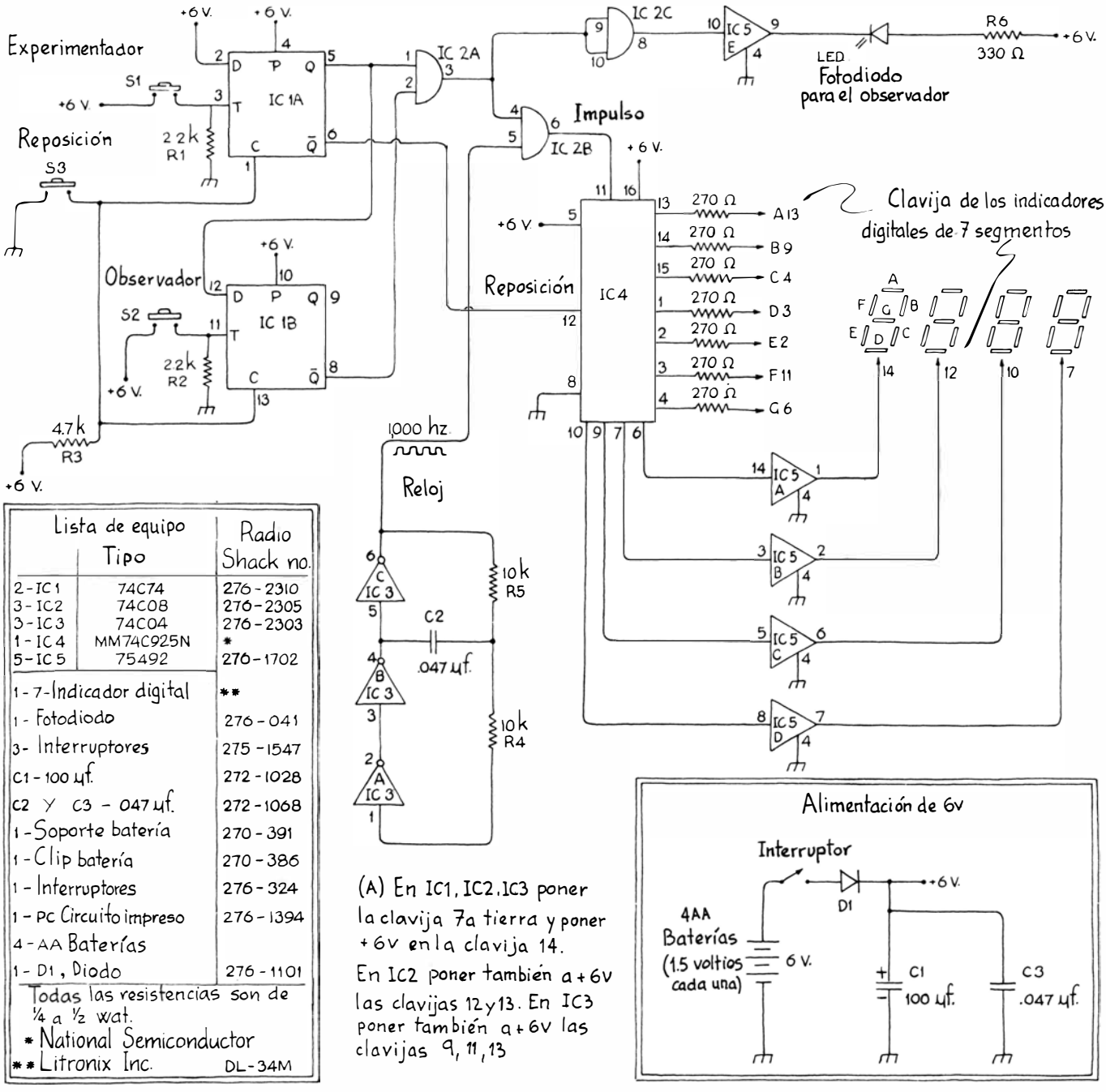
les un ojo ve la escena ligeramente distinta de la que ve el otro ojo, creando un efecto de profundidad.

En el experimento de Julesz y White, a un ojo se le mostraba, en su película, una escena más tarde que al otro ojo. Se perdía pues el cuadrado central, debido a que la selección de puntos era fortuitamente diferente de un cuadro a otro. Luego, se situaba un filtro ajustable delante del ojo que recibía la imagen adelantada. El observador ajustaba la obscuridad del filtro hasta que el retraso en la percepción del cuadro por aquel ojo era suficiente para que el cerebro recibiera, de forma simultánea, las percepciones correlativas izquierda y derecha de las escenas. El cuadrado central se hacía visible de nuevo.

En el efecto del péndulo, la profundidad aparente del movimiento pendular puede producirse por la adaptación de los ojos a la obscuridad y por el filtro obscuro. Deslumbre uno de los ojos durante unos cuantos minutos y mire entonces a un péndulo en oscilación. El efecto de profundidad se hará evidente, de la misma forma que si el otro ojo mirara a través de un filtro. El ojo deslumbrado se adaptaba a las condiciones de mayor iluminación y, por tanto, respondía más rápidamente de lo normal.

Algunos investigadores han referido que el efecto también aparece si se adapta uno de los ojos a la obscuridad. Si se tapa un ojo durante 15 o 20 minutos, y se mira luego con ambos un péndulo en oscilación, se puede percibir un esbozo del efecto Pulfrich (algunas personas lo ven, aunque yo no he podido).

Otro ejemplo de cómo las adaptaciones de nuestros sentidos nos hacen ver un mundo irreal es el hecho siguiente: Si miramos fijamente el péndulo mientras se mueve, la profundidad de su mo-



Lista de equipo	Tipo	Radio Shack no.
2 - IC1	74C74	276 - 2310
3 - IC2	74C08	276 - 2305
3 - IC3	74C04	276 - 2303
1 - IC4	MM74C925N	*
5 - IC5	75492	276 - 1702
1 - 7 - Indicador digital		**
1 - Fotodiodo		276 - 041
3 - Interruptores		275 - 1547
C1 - 100 µf.		272 - 1028
C2 Y C3 - 047 µf.		272 - 1068
1 - Soporte batería		270 - 391
1 - Clip batería		270 - 386
1 - Interruptores		276 - 324
1 - PC Circuito impreso		276 - 1394
4 - AA Baterías		
1 - D1, Diodo		276 - 1101

Todas las resistencias son de ¼ a ½ wat.
* National Semiconductor
** Litronix Inc. DL-34M

Circuito correspondiente al aparato para medir el retraso visual

vimiento elíptico es función del tiempo que llevemos con el filtro obscuro situado delante de nuestro ojo. Al principio hay un retraso visual de forma inmediata y, como consecuencia, una profundidad en el recorrido del péndulo. Tanto una cosa como la otra van aumentando paulatinamente durante los siguientes veinte minutos, al cabo de los cuales el ojo cubierto se ha adaptado ya a la menor iluminación.

El movimiento elíptico del péndulo en el efecto Pulfrich normal desaparece si se mira fijamente el péndulo, en lugar de atender al fondo. Al parecer, cuando los ojos siguen al péndulo en su recorrido, en su trayectoria real, lo que logran es mantener la imagen del péndulo en la misma zona de las dos retinas, eliminando la diferencia de ángulos entre la referencia y el péndulo y, por tanto, destruyendo el efecto de la rotación. El efecto puede lograrse de nuevo aunque uno siga la trayectoria del péndulo si se obscurece el fondo de uno de los ojos. Este efecto ha sido demostrado recientemente por diferentes investigadores usando las señales de un osciloscopio en lugar de péndulos. Pero el efecto puede ser visto también con un péndulo simple.

Ponga una lámina grande de un filtro polarizador detrás del péndulo y una pequeña linterna, así como el objeto normal de referencia detrás del filtro. Delante de uno de sus ojos coloque un pequeño filtro polarizador orientado de manera que obscurezca el fondo que dicho ojo va a ver. El filtro polarizador situado detrás del péndulo debe ser lo suficientemente grande como para que el péndulo, en sus oscilaciones, no se salga de su campo. Ahora siga con la vista el recorrido del péndulo. Si el ojo izquierdo ve el trasfondo más obscuro que como lo ve el ojo derecho, parecerá que el péndulo gira en el sentido de las agujas del reloj igual que antes, a pesar del recorrido real. Aumentando la obscuridad del trasfondo mediante la rotación del filtro polarizador que habíamos colocado delante del ojo citado, se incrementa la profundidad de la trayectoria elíptica del péndulo; si se pone el pequeño filtro polarizador enfrente del otro ojo, es decir, sobre el ojo derecho, se consigue, como era de esperar, que el movimiento sea antihorario.

Como las imágenes de la lámina del filtro polarizador y la del objeto de referencia se mueven a lo largo de la retina, el incremento del retraso visual provocado por el hecho de estar la visión del ojo filtrada, da lugar al efecto de que la distancia entre el peso y el objeto de referencia esté cambiando constantemente. La mayor parte de esta profundidad variable se le atribuye al peso, tal vez porque es más fácil pensar en un cambio en la distancia que lo separa del peso que en un cambio en la distancia que lo separa del trasfondo y del objeto de referencia, ya que ambas cosas se sabe ciertamente que están quietas. Como resultado, el péndulo parece moverse a lo largo de una órbita elíptica incluso cuando uno está mirando fijamente al peso durante su recorrido.

El experimento con la ilusión del péndulo Pulfrich es una forma difícil de medir el retraso visual producido por un filtro obscuro dado. Una razón por la cual otros investigadores diseñaron experimentos distintos era el conseguir una medida del retraso con mayor precisión. En algunos experimentos realizados por mí mismo, preferí medir el tiempo de respuesta por un método relativamente simple, en el que un observador apagaba una luz que yo encendía. El tiempo se medía en milisegundos. El circuito que controlaba la luz y el reloj digital para el experimento fue diseñado y construido por el autor y por Harry Freedman, de la Universidad estatal de Cleveland.

Las pastillas de los circuitos integrados identificados en la figura como *IC* (de "integrated circuit") 1*A* y 1*B* eran circuitos basculantes *"D"*. Inicialmente la salida *Q* de *IC* 1*A* producía una señal lógica de nivel 0 y la $\overline{Q}$ una señal lógica de nivel 1. (En una señal lógica de nivel 0 no se produce diferencia de potencial; una señal lógica de nivel 1 es aquella en que el nivel de la diferencia de potencial es superior a 0.) Cuando pulsaba el interruptor *S*1, las salidas *Q* y $\overline{Q}$ de *IC* 1*A* cambiaban de estado; entonces *Q* producía una señal lógica de nivel 1. El estado de esta salida permanecía inalterado hasta que terminaba la prueba y yo pulsaba el interruptor de reposición *S*3, devolviendo *Q* y $\overline{Q}$ a sus estados iniciales.

Al pulsar *S*1, la señal lógica de nivel 1 de la salida *Q* de *IC* 1*A* iba a *IC* 2*A* que era una puerta "y". Esta puerta produce una salida lógica de nivel 1 únicamente si las dos entradas que recibe están en el mismo estado lógico. En este caso, *IC* 1*B* estaba ya enviando una señal lógica de nivel 1 a dicha puerta; cuando yo pulsaba mi interruptor, la puerta recibía dos señales de estas características y, por tanto, enviaba una señal lógica de nivel 1 a *IC* 2*C* e *IC* 5*E* para encender el diodo emisor de luz al objeto de que lo viera el observador.

Se enviaba otra señal lógica de nivel 1 desde la puerta *IC* 2*A* a otra puerta "y" (*IC* 2*B*) que la comparaba con la señal procedente de un circuito oscilador que funcionaba como reloj. A una frecuencia de 1000 veces por segundo, el reloj generaba una señal lógica de nivel 1 para *IC* 2*B*. Por tanto, *IC* 2*B* hacía una comparación 1000 veces por segundo de sus entradas y enviaba a dicha frecuencia su propia señal lógica de nivel 1 a *IC* 4. El circuito *IC* 4 era un contador de cuatro dígitos con siete segmentos de salidas decodificadas que se empleaban para activar un indicador digital de cuatro dígitos con siete segmentos, que indicaba el tiempo de respuesta del observador en milisegundos.

El *IC* 4 continúa recibiendo señales a razón de 1000 por segundo y el indicador sigue mostrando el conteo hasta que el observador pulsa el interruptor *S*2. La salida a partir de Q de *IC* 1*B* cambia entonces a señal lógica de nivel 0, y la puerta *IC* 2*A* no realiza ya por más tiempo la comparación lógica entre los *IC* 1*A* y 1*B* basculantes. Se apaga el diodo emisor de luz del observador; la señal lógica de nivel 1 tampoco se envía más a la puerta *IC* 2*B*. La señal del reloj es, por tanto, ignorada y el indicador se para, mostrando el último conteo, esto es, el tiempo de respuesta del observador en milisegundos. Todo permanece así hasta que se pulse el interruptor de reposición y los dos circuitos *IC* 1*A* y 1*B* se pongan de nuevo en sus estados iniciales.

Se debe tener cuidado de no invertir las conexiones de la batería o conectar las clavijas de suministro de energía al revés, ya que se destruirían. La resistencia *R*5 deberá ajustarse de tal forma que el reloj marque a razón de 1000 hertzios (ciclos por segundo). Esto se puede comprobar dejando que el circuito cuente durante 10 segundos como si fuera un reloj parado. Dado que la lectura más alta del contador es 9999, a los 10 segundos éste deberá registrar 0000. Entonces se debe ajustar la resistencia hasta alcanzar esta correlación. Por ejemplo, incrementando el valor de *R*5, se reduce la velocidad de conteo.

Mis observadores fueron tres estudiantes de la Universidad de Cleveland: Teresa Chandler, Sandy Hoskins y Bruce Firtha. Un observador miraba el diodo emisor de luz a través de dos grandes hojas cruzadas de filtros polarizadores. Ajustando el ángulo entre los sentidos de polarización de los filtros, yo podía seleccionar la iluminación que llegaba al observador. Para medir los ángulos del filtro fijé un poco de cinta adhesiva clara

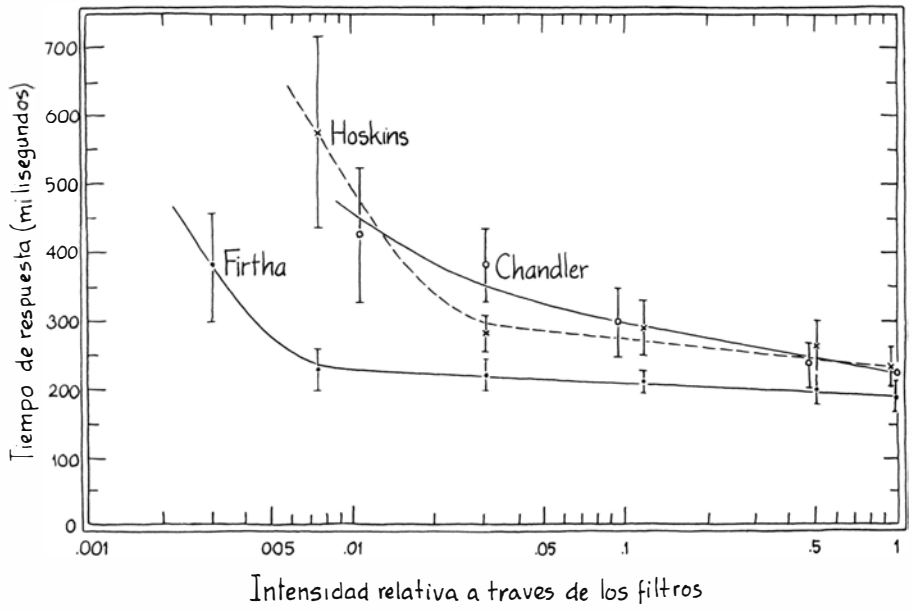
a cada filtro, de forma que las cintas fueran perpendiculares cuando los filtros lo fueran también; así bloqueaban la máxima cantidad de luz que recibían procedente de una bombilla. Se tomaron mediciones de otras orientaciones del filtro en un prolongador, colocado entre los trozos de cinta adhesiva. Probablemente, el índice de error no variaría mucho de +2 a −2 grados.

La intensidad de la luz transmitida por los filtros cruzados se comparaba con la intensidad (llamada 1) transmitida por filtros paralelos. Para cada orientación, el valor relativo de la intensidad transmitida era el cuadrado del coseno del ángulo entre los sentidos de polarización de los filtros cruzados. Estimé la intensidad relativa transmitida a través de filtros perpendiculares a partir de datos de transmisión de la Polaroid Corporation para el tipo de los filtros de polarización que estaba usando. Aunque para filtros perpendiculares la transmisión era baja, no llegaba a ser nula exactamente. Cuando se tomaron los datos con las luces de la habitación encendidas, los observadores se cubrieron la cabeza y los filtros con un paño negro, de manera que las luces no produjeran reflejos en las caras de los filtros que daban a los observadores.

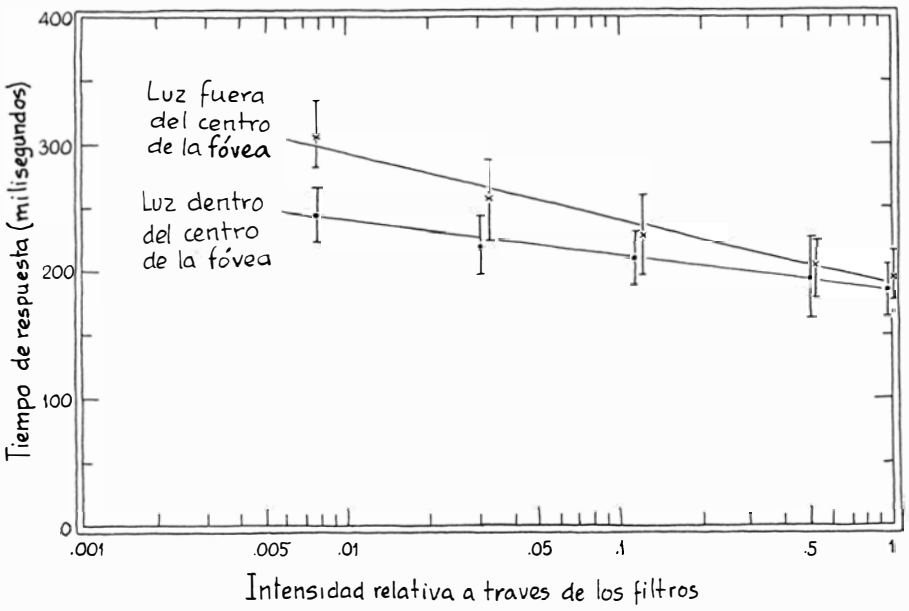
Cada vez que la luz de diodo se encendía, el observador la apagaba y yo anotaba el tiempo de respuesta. Para cada colocación de los filtros de polarización tomé, por lo menos, 50 mediciones y después estudié su significado y su desviación típica. Este tiempo medio de respuesta incluye cualquier retraso visual y también el mayor tiempo de respuesta motora del observador. Traté de encender la luz del diodo aleatoriamente, de manera que el observador no pudiera anticipar el hecho. Los tiempos de respuesta especialmente largos o cortos que resultaban ocasionalmente por el descuido o anticipación del observador se desechaban de la información.

Un problema que el experimentador puede hallar es el de encontrar un observador lo suficientemente interesado en el experimento como para concentrarse continuamente en el diodo. El experimento es cansado y la falta de interés puede aumentar considerablemente las desviaciones típicas. Mi información la tomé de observadores en una habitación obscura, dejándoles 10 minutos por lo menos para que sus ojos se adaptaran a la obscuridad. En una misma sesión se tomaron todos los datos de un observador. La información mezclada, tomada en días diferentes, podría complicar, probablemente, el experimento debido a los eventuales cambios diarios en los tiempos de respuesta motora.

En la ilustración de la página anterior puede verse la representación de parte de la información en un gráfico semilogarítmico. Si se eliminaran los tiempos de respuesta motora del experimento, los tiempos restantes de respuesta visual seguirían posiblemente este tipo de curva, pero con unos intervalos de tiempos más cortos. Es decir, el retraso visual aumentaría a medida que la iluminación del estímulo iría decreciendo; el ascenso



Representación gráfica del tiempo de respuesta de tres observadores a medida que se iba incrementando la intensidad de la luz



Respuestas cuando la luz de estímulo coincidía con el centro de la fóvea o fuera de ella

sería mayor con niveles de iluminación bajos.

Recogí datos también con las luces de la habitación encendidas. Algunos investigadores han descubierto que el retraso visual decrece cuando aumenta la iluminación total que rodea al estímulo. Sin embargo, dentro de las desviaciones típicas de mis datos, no he encontrado diferencia significativa en la curva seguida por respuesta de un observador con las luces de la habitación encendidas y con ellas apagadas.

Cuando uno de mis observadores miraba el diodo, la imagen del mismo se formaba en la fóvea, que posee conos densamente empaquetados, pero carece de bastones. Algunas investigaciones publicadas indican que el retraso visual puede ser diferente si la imagen del estímulo cae en cualquier otro lugar (es decir, fuera de la fóvea), en parte porque la respuesta visual envolvería entonces a los bastones. El lector puede tratar de conseguir este efecto haciendo que el observador mire a un objetivo pequeño desplazado a un lado del diodo.

Para comprobar este posible cambio en la respuesta visual, determiné primero la curva de respuesta de Bruce Firtha (con el ojo izquierdo solamente) en una habitación en penumbra. Su ojo derecho estaba tapado con un trozo de cartón. Firtha miró directamente al diodo como antes. La curva resultante era casi la misma que la anterior. Después repetí el experimento con Firtha, mirando a un pequeño punto desviado tres centímetros del diodo. El diodo estaba rodeado por un cartón corriente. Este procedimiento hacía que la imagen del diodo cayera unos 4 grados fuera del centro de la fóvea y, por tanto, se colocara en una zona que tiene algunos bastones. La curva de respuesta fue la misma para los niveles de iluminación altos, pero subió mucho para los niveles más bajos.

Tal subida hace pensar que, en condiciones de poca iluminación, el retraso visual se incrementa más deprisa en las zonas de la retina exteriores a la fóvea que directamente en el centro de la misma. La visión con luz fuerte se llama fotópica, y está determinada por la respuesta de los conos. La visión con luz débil se llama escotópica y está determinada por la respuesta de los bastones.

Los resultados nos llevan a pensar que la visión escotópica fuera del centro de la fóvea produce un mayor retraso visual que en el centro de la fóvea, debido a la abundancia de bastones.

Se puede hacer otro tipo de trabajos sobre los retrasos visuales, bien con este tipo de aparato o con otro. ¿Qué trayectoria sigue la curva de respuesta en función de la distancia angular desde el centro de la fóvea? ¿Se podrían representar las curvas de respuesta de la zona que rodea a la fóvea? Si los trabajos subsiguientes indican que la zona del centro de la fóvea, que carece de bastones, tiene una curva de respuesta diferente de las curvas de otras zonas de la retina, se podría pensar que el retraso visual de los bastones es distinto del que tienen los conos.

Se pueden también poner blancos estimulantes de diferentes tamaños. Un blanco pequeño, al que se mira directa-

mente, estimula sólo el centro de la fóvea mientras que un blanco mayor incita una porción mayor de la retina y, por consiguiente, podría provocar respuesta de los bastones. La respuesta visual en este caso es una superposición sobre toda la zona de la retina que es estimulada.

No estoy muy seguro de cómo deberían ser las curvas de respuesta en función de las luces de la habitación. Aunque no he notado ningún cambio en la curva de respuesta al encender las luces (por lo menos en los datos que tomé) quizá al lector le interese repetir el experimento. Se podrían iluminar los ojos directamente con una luz pequeña en lugar de iluminar el diodo estimulador y sus entornos. A medida que los ojos se van adaptando a un nivel de iluminación superior ¿responden visiblemente más pronto? Este, al menos, fue el resultado que obtuve con el efecto del péndulo.

El lector debe recordar que en cualquier experimento se deben recoger muchos datos, promediar los resultados y comparar después éstos teniendo en cuenta las desviaciones típicas. Dos resultados medios que han sido recogidos bajo circunstancias distintas y que caen dentro de una desviación típica uno del otro, se consideran normalmente como indiferenciables.

Cambios registrados por un observador en movimiento

El retraso visual puede afectar a la propia percepción del paisaje cuando se va en coche, si se mira hacia un lado de la carretera llevando puestas unas gafas de sol con cristal en un ojo solamente. Para ello, se debe fijar la vista en objetos distantes, que estén situados primero en un lado del coche y después en el otro. Al mismo tiempo se irán comparando las velocidades a que parecen pasar los objetos situados en primer plano en ambos lados. Si se tapa el ojo izquierdo con el cristal obscuro, los objetos de la izquierda parecen pasar más despacio que los de la derecha. Si se estima la velocidad del coche por el movimiento del paisaje exterior, la vista del lado izquierdo indica que el coche se está moviendo más lentamente de lo real, mientras que la del lado derecho dice lo contrario, parece que se mueve a mayor velocidad de la real.

Este procedimiento altera también los tamaños y distancias de los objetos en primer plano. Los que están del lado del coche que da sensación de menor velocidad tienden a parecer más próximos y más pequeños de lo que verdaderamente son. Los objetos del otro lado parecen estar más lejanos y ser mayores de lo que ciertamente son.

Este falseamiento de la velocidad, distancia y tamaño se produce por el retraso visual que ocasiona el filtro obscuro puesto enfrente de un ojo. Ese ojo envía una respuesta retrasada al cerebro. Como ocurría con el efecto del péndulo, la respuesta retrasada altera el ángulo entre un objeto de primer plano y el objeto de referencia situado en un plano posterior. Si es el ojo izquierdo el obstruido y se mira hacia la derecha, el ángulo entre el objeto en primer plano y el de referencia se incrementa debido al retraso. Este incremento significa que el objeto en primer plano está más lejos de lo que realmente está. Si se mira al objeto como estando más lejano aunque ocupe el mismo tamaño angular en el campo de visión, el observador se ve obligado a reconocer que es mayor de lo que realmente es. De la misma forma, si se juzga que está más distante, pero que todavía cruza el campo de visión a la misma velocidad (es decir, en una cantidad de tiempo determinada cruza un ángulo concreto del campo de visión del observador independientemente de a qué distancia crea éste que está), habrá que reconocer que se mueve a mayor velocidad de la real. El retraso visual altera la percepción de la profundidad de los objetos, a consecuencia de lo cual el observador no puede apreciar su tamaño ni la velocidad a que pasan.

Este falseamiento de la velocidad, la distancia y el tamaño se puede demostrar ante una pequeña audiencia empleando una película hecha desde un coche en movimiento. James T. Enright, de la Universidad de California en San Diego, aconseja que la cámara enfoque algún objeto distante del lado de la carretera mientras el coche lleve una velocidad de unos 20 kilómetros por hora. El efecto quedará muy claro si existe ese objeto distante y además otros en primer plano a una distancia de unos 100 metros. Cada observador de la audiencia debe llevar gafas de sol con un solo cristal o ponerse cualquier otro filtro oscuro delante de un ojo.

Ronald Ives escribía en 1940, en el *Journal of the Franklin Institute,* que al atardecer las luces de las calles parecían encenderse ligeramente antes en los cruces que en las partes centrales. Incluso afirmaba que en el segundo grupo parecía que las luces se iban encendiendo sucesivamente a lo largo de la calle tardando más las más lejanas al observador. Sin embargo, dado que las farolas de las calles tenían un mismo circuito, el efecto tenía que ser una ilusión óptica.

Este efecto se debía al retraso visual que he estado describiendo. Había más luces en los cruces que en ningún otro punto entre éstos y, por tanto, el observador recibía más luz de los cruces. El retraso visual para un estímulo brillante es menor que para otro tenue. Aunque todas las luces se encendían simultáneamente, las de los cruces se veían antes debido a la reducción del retraso visual procedente del estímulo. Las luces a lo largo de la calle parecían irse encendiendo una por una, siendo las últimas las más lejanas. Esto era debido a que su estímulo era progresivamente más débil y ello producía un incremento en el retraso visual.

¿Puede afectar, significativamente, el retraso visual, producido por las gafas de sol, al tiempo de reacción ante un imprevisto? Es posible. Supongamos que unas gafas de sol son lo suficientemente obscuras como para añadir 100 milisegundos al tiempo de respuesta de una persona (un caso extremo). Si esa persona estuviera conduciendo a una velocidad de unos 90 kilómetros por hora (unos 25 metros por segundo), el tiempo de respuesta incrementado significaría una distancia de parada adicional de unos 2,5 metros.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

LA PRODUCCION MUNDIAL DE PETROLEO

PETROLEUM RESOURCES: HOW MUCH OIL AND WHERE. John D. Moody y Robert E. Geiger en *Technology Review,* págs. 38-45; marzo/abril, 1975.

ENERGY: GLOBAL PROSPECTS 1985-2000: Workshop on Alternative Energy Strategies. McGraw-Hill Book Company, 1977.

ENERGY SUPPLY TO THE YEAR 2000: GLOBAL AND NATIONAL STUDIES. Workshop on Alternative Energy Strategies. The MIT Press, junio, 1977.

LEPTONES PESADOS

ELECTRON-POSITRON ANNIHILATION AND THE NEW PARTICLES. Sidney D. Drell en *Scientific American,* vol. 232, n.º 6, págs. 50-62; junio, 1975.

WHAT IS THE WORLD MADE OF? Gerald Feinberg. Anchor Press, 1977.

PARTICULAS FUNDAMENTALES CON ENCANTO. Roy F. Schwitters en *Investigación y Ciencia,* n.º 15, págs. 32-48; diciembre, 1977.

LA SUPERFICIE DE MARTE

MARS AS VIEWED BY MARINER 9: NASA SPECIAL PUBLICATION 329. National Aeronautics and Space Administration. Government Printing Office, 1974.

THE NEW MARS: THE DISCOVERIES OF MARINER 9. William K. Hartmann y Odell Raper. NASA Special Publication 337. Government Printing Office, 1974.

MARS. James B. Pollack en *Scientific American,* vol. 233, n.º 3, págs 107-117; septiembre, 1975.

THE GEOLOGY OF MARS. Thomas A. Mutch, Raymond E. Arvidson, James W. Head, Kenneth L. Jones y R. Stephan Saunders. Princeton University Press, 1977.

SCIENTIFIC RESULTS OF THE VIKING PROJECT. *Journal of Geophysical Research,* vol. 82, n.º 28; 30 de septiembre de 1977.

EL FLUJO DE ENERGIA EN UN ECOSISTEMA DE BOSQUE

ENERGY EXCHANGE IN THE BIOSPHERE. D. M. Gates. Harper & Row, 1962.

ECOLOGY. Robert E. Ricklefs. Chiron Press, 1973.

BIOCHEMISTRY OF A FORESTED ECOSYSTEM. Gene E. Likens, F. Herbert Bormann, R. S. Pierce, J. S. Eaton y N. M. Johnson. Springer-Verlag, 1977.

COMO FABRICAN ATP LAS CELULAS

PROTON-TRANSLOCATION PHOSPHORYLATION IN MITOCHONDRIA, CHLOROPLASTS AND BACTERIA: NATURAL FUEL CELLS AND SOLAR CELLS. Peter Mitchell en *Federation Proceedings,* vol. 26, n.º 5, págs. 1370-1379; septiembre-octubre, 1967.

KINETICS OF ADENOSINE TRIPHOSPHATE SYNTHESIS IN BOVINE HEART SUBMITOCHONDRIAL PARTICLES. William S. Thayer y Peter C. Hinkle en *The Journal of Biological Chemistry,* vol. 250, n.º 14, págs. 5336-5342; 25 de julio de 1975.

A NEW LOOK AT MECHANISMS IN BIOENERGETICS. Efraim Racker. Academic Press, Inc., 1976.

OXIDATIVE PHOSPHORYLATION AND PHOTOPHOSPHORYLATION. Paul D. Boyer, Britton Chance, Lars Ernster, Peter Mitchell, Efraim Racker y E. C. Slater en *Annual Review of Biochemistry,* vol. 46, págs. 955-1026; 1977.

MATEMATICA COMBINATORIA DE LA PLANIFICACION

ON PACKING SQUARES WITH EQUAL SQUARES. Paul Erdös y Ronald L. Graham. *Journal of Combinatorial Theory (Series A),* vol. 19, n.º 1, págs. 119-123; julio, 1975.

COMPUTER AND JOB-SHOP SCHEDULING THEORY. Dirigido por Edward G. Coffman. John Wiley & Sons, Inc., 1976.

NEW DIRECTIONS IN CRYPTOGRAPHY. Whitfield Diffie y Martin E. Hellman en *IEEE Transactions on Information Theory,* vol. IT-22, n.º 6, págs. 644-654; noviembre, 1976.

BRUEGEL EL VIEJO, GUIA PARA EL ESTUDIO DE LA CIENCIA DEL s. XVI

GRAPHIC WORLDS OF PETER BRUEGEL THE ELDER. H. Arthur Klein. Dover Publications, Inc., 1963.

GREAT STRUCTURES OF THE WORLD. H. Arthur Klein y Mina C. Klein. The World Publishing Company, 1968.

PETER BRUEGEL THE ELDER, ARTIST OF ABUNDANCE: AN ILLUSTRATED PORTRAIT OF HIS LIFE, ERA, AND ART. H. Arthur Klein y Mina C. Klein. The Macmillan Company, 1968.

SCIENCE AND SOCIETY IN THE SIXTEENTH AND SEVENTEENTH CENTURIES. Alan G. R. Smith. Thames and Hudson, Londres, 1972.

THE WORLD OF MEASUREMENTS. H. Arthur Klein. Simon and Schuster, 1974.

EL MANTENIMIENTO DE LA VARIABILIDAD GENETICA DE LAS POBLACIONES

GENETICS OF THE EVOLUTIONARY PROCESS. Theodosius Dobzhansky. Columbia University Press. 1971.

THE GENETIC BASIS OF EVOLUTIONARY CHANGE. Richard C. Lewontin. Columbia University Press. 1974.

MOLECULAR EVOLUTION. Dirigido por Francisco J. Ayala. Sinauer Associates, Inc. 1976.

JUEGOS MATEMATICOS

COMPUTABILITY AND UNSOLVABILITY. Martin Davis. McGraw-Hill Book Company, 1958.

GÖDEL'S PROOF. Ernest Nagel y James R. Newman. New York University Press, 1958.

THE UNDECIDABLE. Dirigido por Martin Davis. Raven Press. 1965.

TALLER Y LABORATORIO

STEREOPSIS, VISUAL LATENCY, AND THREE-DIMENSIONAL MOVING PICTURES. James T. Enright en *American Scientist,* vol. 58, n.º 5, págs. 536-545: septiembre-octubre, 1970.

LATENCY FUNCTIONS IN HUMAN VISION. R. J. W. Mansfield en *Vision Research,* vol. 13, págs. 2219-2234; 1973.

EYE MOVEMENTS AND THE PULFRICH PHENOMENON, B. J. Rogers. J. J. Steinbach y H. Ono en *Vision Research,* vol. 14, págs. 181-185, 1974.

Taller y laboratorio

El atractivo de la llama de una vela realzado por la física y la química que subyace a la misma

Jearl Walker

Yo crecí a la luz de la vela, que nos daba la iluminación necesaria para combatir la obscuridad de la noche en las grandes tempestades de Texas. Recuerdo con frecuencia los momentos en que estaba tendido en la cama antes de dormirme, hipnotizado y maravillado ante la contemplación de la llama ardiendo. Había visto otras muchas cosas quemarse, pero siempre lo hacían mucho más rápidamente. La vela ardía tan lentamente que la mecha duraba toda la noche e, incluso, un par de ellas.

Había otros aspectos de las velas que me intrigaban casi tanto como lo anterior: ¿por qué una vela hecha de cera era mejor que otra fabricada con un material distinto? ¿Por qué la mayor parte de la llama era amarilla y sólo tenía una pequeña zona en su base de color azul? ¿Por qué se formaba en el interior de la llama una especie de cono obscuro entre la mecha y la zona amarilla de la misma? ¿Por qué algunas velas producían humo, otras ardían limpiamente y unas terceras parpadeaban a distinta velocidad? Finalmente, ¿por qué tizna de negro la llama de una vela mientras que, si se apaga, el humillo que desprende es blanco?

Todas estas son viejas preguntas que probablemente tengan viejas respuestas. Pero la realidad es que algunas de ellas se siguen contestando con algunas reservas. En este trabajo describiré cómo puede uno fabricarse su propia vela y cómo investigar sobre la física y la química de la llama de una candela. De aquí saldrán respuestas a algunas de las preguntas básicas. En parte seguiré las huellas de Michael Faraday, quien se sentía fascinado tanto por la sencillez como por la complejidad de las llamas de las velas.

Además de la parafina, que era la materia prima con la que mi abuela hacía las velas, se han empleado otros materiales, a saber: sebo, estearina, espermaceti (obtenido a partir del esperma de ballena o de cachalote) y cera de abejas. En la actualidad se puede comprar parafina en cualquier almacén de comestibles o en tiendas de pasatiempos. A veces viene mezclada con estearina (ácido esteárico) para elevar su punto de fusión, darle mayor resistencia a la vela y hacer que la misma se consuma más lentamente.

La mecha también se puede adquirir fácilmente. Suelen hacerse de hilo de algodón trenzado, el cual ha sido previamente curtido en una sustancia que evita que produzca humos. Este tratamiento es necesario, ya que el algodón natural ardería demasiado rápidamente y produciría mucho humo. El objetivo es hacer que la mecha arda de manera que produzca una llama alargada, para lo cual las sales inorgánicas contenidas en la celulosa de la mecha se combinan con los fosfatos y los boratos de las sales inhibidoras con lo que se obtendrá una descomposición sin cenizas.

Hacer una vela no es difícil; a mí me enseñó a hacerlas Liz Knepp, de Cleveland, pero se pueden encontrar procedimientos similares y con todos los detalles en los muchos libros que existen sobre dicha técnica. Empleé un recipiente de dos pisos, de manera que el agua hirviera en la parte inferior y la parafina se calentara en la superior. Debe controlarse la temperatura por medio de un termómetro casero. Si la parafina no se ha mezclado bien con la estearina con el fin de hacerla más resistente, se fundirá en un rango de temperaturas comprendido entre 48 y 74º Celsius. Si la estearina no ha sido suficientemente dosificada, debe añadirse una cantidad de ésta tal que sea igual al 5 por ciento del volumen total de la parafina. La estearina incrementa el punto de fusión y evitará que la vela arda demasiado de prisa. Las velas de las iglesias son, a menudo, de estearina solamente. En el recipiente no debe sobrecalentarse la parafina ni exponerla a la llama directamente. Si se incendiara, no debe apagarse con agua, ya que se endurecería formando terrones.

Mientras la cera se funde, hay que preparar el molde de la vela. Se pueden usar diversos tipos de moldes metálicos según la forma que se quiera dar a la vela, pero debe evitarse el uso de aquellos de los que sea luego difícil extraer la candela. En el fondo del molde se abrirá un agujero y por éste se introducirá una cantidad adecuada de mecha, la cual se sujetará practicando un nudo en el exterior. En el extremo abierto del molde se pondrá un lápiz en posición horizontal, al cual se atará la mecha de forma que quede tirante a lo largo de todo el molde. Para facilitar la extracción de la vela, deberá rociarse el interior del molde con silicona, utilizando un pulverizador.

La elección de la mecha es muy importante, ya que de ello dependerá el que la vela arda de forma adecuada. Si la mecha es demasiado ancha, producirá una llama humeante; si demasiado estrecha, producirá una llama vacilante que acabará apagándose. Una regla no muy precisa, pero muy útil, que puede seguirse es la que dice que la mecha debe elegirse de acuerdo con el diámetro de la vela.

Cuando la cera se haya fundido, viértase cuidadosamente en el molde.

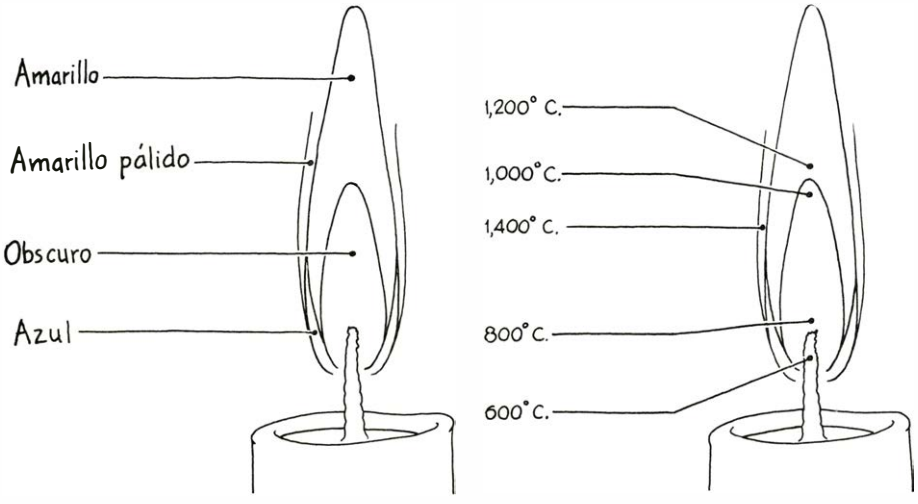


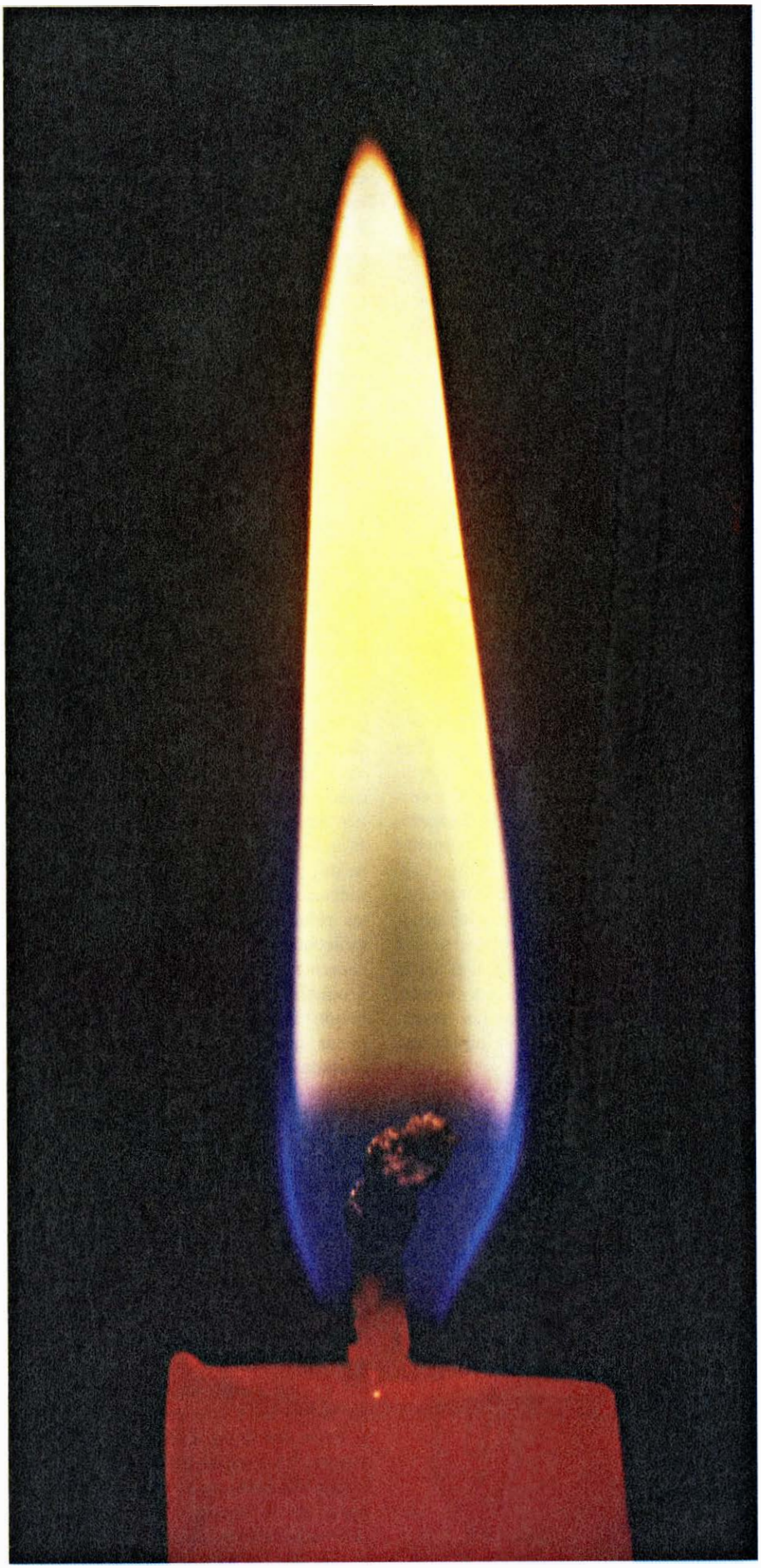
Diagrama de colores y temperaturas típicas de una llama

Déjela enfriar un rato e introduzca entonces, a todo lo largo del eje longitudinal de la vela y en la zona próxima a la mecha, un destornillador fino o cualquier otro utensilio de forma similar, con lo que eliminará las burbujas de aire y conseguirá que la contracción que sufrirá la cera al enfriarse sea homogénea. Una vez retirado el destornillador, hay que rellenar el hueco dejado por éste con cera fundida. La acción anterior debe repetirse varias veces con el fin de conseguir una contracción suficiente. Al día siguiente ya se puede abrir el molde y, tras quitar los nudos de la mecha, se saca la vela. Tenemos, pues, la vela con la cual comenzar los experimentos.

Faraday, cuyo nombre se asocia normalmente con sus amplios trabajos de investigación sobre la electricidad y el magnetismo, hizo también sus escarceos sobre la física y la química de las velas. En 1860 y 1861, como parte de las celebraciones de Navidad en la Royal Institution y para su "juvenil auditorio", Faraday dio seis lecciones encaminadas a mostrar el vasto alcance científico que oculta una simple vela. Tratando de comprender por qué una vela arde, he repetido varios de los experimentos de Faraday, así como algunos otros y también he investigado las teorías establecidas a proposito de la llama. Quitando las modernas teorías sobre las moléculas y las emisiones atómicas, las indagaciones sobre las llamas de las velas han progresado sorprendentemente poco desde los tiempos de Faraday.

Cuando se enciende una vela, se ve rápidamente cómo el calor radiado por la llama funde la cera próxima a la mecha; esta cera líquida sube por la mecha en virtud de la atracción capilar, lo cual es como decir que las fuerzas atractivas entre las moléculas de cera y las moléculas de la mecha hacen subir la cera. Una vez que llega a la punta de la mecha se vaporiza. Las moléculas de hidrocarburo liberadas llevan a cabo diversas funciones en la llama.

La llama tiene características muy interesantes, que no son otras que las que yo descubrí de niño. Inmediatamente encima de la mecha puede observarse un cono obscuro que está rodeado por la zona amarilla, que es, en realidad, la principal causa de la luminosidad. En los lados de la llama y cerca de la mecha hay unas zonas azules. Dependiendo del diámetro de la mecha y de la altura de la llama, las zonas azules pueden llegar hasta una determinada altura de la llama o pueden incluso alcanzar la parte alta de la zona amarilla. Es sorprendente el hecho

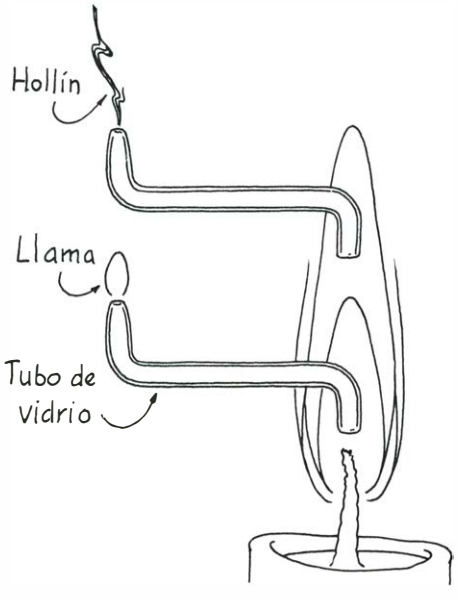


Llama de una vela

de que las moléculas combustibles, al vaporizarse, den lugar a tres zonas distintas en lugar de una sola zona de color uniforme.

En la moderna clasificación de las llamas, el tipo de las producidas por las velas se denomina "llamas de difusión". Otro tipo familiar son las llamadas "premezcladas", cuyos ejemplos más típicos son los mecheros Bunsen y la llama de las estufas de gas. En una llama de difusión, la relación de combustión viene determinada por la velocidad a la que un gas se mezcla con el otro y viceversa; en una llama premezclada, sin embargo, los gases se mezclan antes de quemarse y, por tanto, la relación de combustión depende de la relación de los caudales o flujos de los gases. Por ejemplo, el gas de las estufas se mezcla con el aire antes de que lleguen a las boquillas de los quemadores. Otras clasificaciones de llamas contemplan la posibilidad de que tengan turbulencia, pero nosotros aquí nos limitaremos a la llama de difusión no turbulente.

Tal vez sorprenda el hecho de que la zona de la llama cuya temperatura es más alta no se encuentre cerca de la mecha. El extremo superior de la mecha es, en relación con el resto, una zona fría, pues su temperatura alcanza solamente unos 600 grados Celsius. Conforme se va subiendo en altura, la temperatura va progresivamente en aumento hasta alcanzar aproximadamente 1200 grados Celsius, en la parte central de la zona amarilla. Un poco más altas, alrededor de 1400 grados Celsius, se dan fuera del centro y por los bordes de la llama amarilla. Esta falta de uniformidad en la distribución de las temperaturas a lo largo de la llama impide una explicación cabal de todo lo concerniente a la emisión luminosa de la llama.



Experimentos con un tubo de vidrio

El cono obscuro constituye una región relativamente fría justo encima de la mecha. Allí, las moléculas combustibles liberadas están insuficientemente calientes y tienen tan poco oxígeno que emiten poca o ninguna luz. Se desconoce en qué estado se encuentran las moléculas liberadas en esta zona, cómo se descomponen en átomos simples o en moléculas diatómicas y dónde se combinan para reaccionar entre sí produciendo partículas sólidas de carbón. Uno de los rasgos más curiosos de las llamas es que, aunque el combustiblevaporizado se encuentre encima mismo de la mecha, en ningún otro punto de la llama se vaporiza combustible aún cuando se ponga en contacto con una cantidad significativa de oxígeno. Contrariamente a la imagen intuitiva que yo tenía de la llama, ni el calor ni la luz de la misma provienen de la simple oxidación del combustible evaporado en la mecha.

Las regiones azules de la llama definen la zona de reacción. En dicha zona, las moléculas grandes de hidrocarburos vaporizados en la mecha se descomponen en moléculas más pequeñas, las cuales reaccionan entre sí y con el oxígeno que se ha difundido por la llama y que proviene del aire que la rodea. La luz azulada se debe principalmente a la emisión de dos moléculas, la molécula de carbón (C_2) y la molécula de un hidrocarburo (CH) que se producen en las referidas reacciones químicas. Estas moléculas en lugar de activarse térmicamente por el calor del entorno, pueden producirse ya con su estado de excitación a partir de las reacciones químicas que las cree. Por lo que la luz azulada quizá no sea una emisión que resulte directamente del calor.

Mientras que los átomos simples emiten luz en una determinada longitud de onda, las moléculas la emiten en lo que se llama bandas de emisión, que están formadas por grupos separados constituidos por conjuntos de longitudes de ondas muy próximas. A menos que se examine la luz por un espectroscopio de gran dispersión, la banda de emisión emitida por una molécula parecerá que se extiende uniformemente sobre un amplio rango de longitudes de onda, sobre todo si se compara con lo que se vería con la luz emitida por un simple átomo. La emisión más fuerte de la molécula CH tiene lugar en una banda alrededor de la longitud de onda del azul (432 nanómetros), junto con otras emisiones que se encuentran en bandas de más cortas longitudes de onda en la zona del azul obscuro. La molécula C_2 emite más intensamente en lo que se ha llamado banda de Swan, un compacto conjunto de bandas en el verde, con menos intensidad en dirección al azul y al azul intenso. En la llama de una vela el efecto concreto de la emisión de estas moléculas es una emisión azulada por lo menos en la parte baja de la zona de reacción.

Para mí la región más interesante de la llama de una vela es la amarilla, conocida por zona del carbono o zona luminosa. Allí las partículas sólidas de carbón son calentadas hasta la incandescencia por los gases y por el calor radiado de la zona de reacción.

Esta incandescencia produce la luz amarillenta. Se emite todo el espectro visible; lo que ocurre es que la emisión en la zona del amarillo es más intensa y su percepción prevalece sobre las demás. La emisión no es como las despedidas por una molécula o por un átomo simple, ya que ahora se emite todo el espectro en vez de colores individuales. Alguien ha podido ver algo similar si alguna vez ha calentado un atizador blanco ya caliente. El calor del atizador hará que las radiaciones térmicas se extiendan por todo el espectro visible, emitiendo todos los colores y, por tanto, dando una percepción neta de luz blanca.

Las partículas sólidas de carbón en la zona luminosa tienen un tamaño que va desde los 10 a los 200 nanómetros, siendo la mayoría de ellas no mayores de los 50 nanómetros. Si una vela humea, está lanzando partículas de carbón sólidas, la mayoría de las cuales serán mayores de 50 nanómetros. La primera persona que explicó la luz amarilla por medio de las partículas incandescentes de carbono sólido fue Humphry Davy, maestro de Faraday. Aunque Davy expuso su teoría hace más de un siglo, el mecanismo por el cual se generan dichas partículas queda por explicar.

Una hipótesis popular es que las grandes moléculas de hidrocarburo, cuando se desprenden, primero se rompen en moléculas de carbono atómico y de carbono diatómico y, luego, se agrupan de algún modo o bien algún agente exterior les hace tomar forma sólida. Según otra hipótesis, los hidrocarburos primero se agrupan para formar partículas sólidas y luego pierden su hidrógeno. En cualquier caso, parece ser una condición fundamental para la formación de dichas partículas que la deficiencia de oxígeno se dé en la zona obscura por encima de la mecha. Sea cual fuere el verdadero mecanismo, las partículas de carbón sólido se forman al tiempo que llegan a la zona luminosa, en donde se hacen incandescentes y donde

producen la delicada llama amarillenta de las velas.

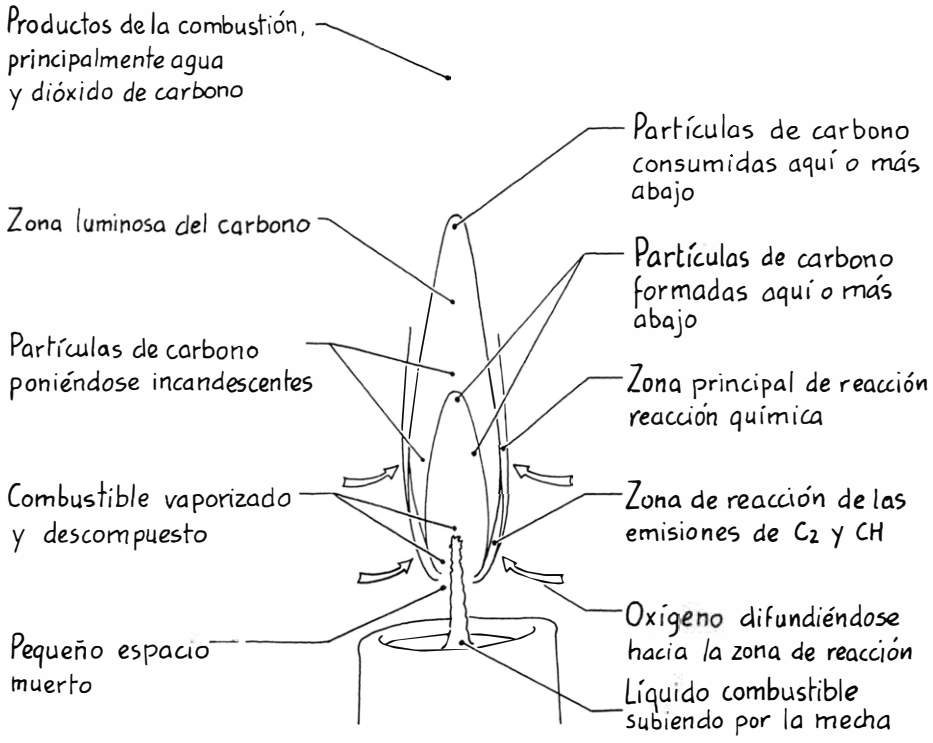
Conforme las partículas van ascendiendo a través de la zona luminosa se van consumiendo por reaccionar con el agua y el dióxido de carbono (los principales productos de la llama) para producir monóxido de carbono. En una llama sin humo, las partículas se consumen totalmente conforme suben hasta la parte alta de la llama. De lo contrario se desprenderían como hollín. El ennegrecimiento por el hollín ocurre normalmente si la mecha es demasiado gruesa, puesto que arrastra una cantidad de combustible tal que no puede ser consumido por la llama.

Vayamos a los experimentos. Una de las demostraciones más simples de Faraday fue colocar la vela a pleno sol y examinar la sombra producida por la llama. La zona más obscura de la sombra procedía del área luminosa, que es la más brillante en la propia llama. La obscuridad de la sombra se produce porque la colección de partículas sólidas es más densa allí. Para actualizar de alguna manera a Faraday proyecté un destello con un láser de neón y helio de baja potencia (20 milivatios) sobre la llama, esperando ver luz láser dispersada por las partículas sólidas de carbón. Sin embargo, la dispersión no era suficientemente intensa como para poder apreciarse a simple vista.

Doblemos ahora sobre un quemador Bunsen de gas un tubo de cristal delgado y corto, como se muestra en la ilustración de la página 116. Hay que afilar un extremo y poner el otro en la parte más baja de la zona obscura de la llama de la vela. Los hidrocarburos vaporizados pasan por el tubo y salen por el extremo afilado en forma de corriente transparente, o blanca si el vapor se condensa de alguna manera y forma gotas pequeñas de cera. El vapor habría producido partículas de carbono si se le hubiera permitido subir a la zona iluminada, pero aún puede arder si se aplica una llama al extremo libre del tubo.

En lugar de quemar así el vapor, se puede recoger en un vaso frío o en una redoma. El vapor se condensará y formará una fina película de cera en las paredes interiores. Esta recuperación de la cera sólida implica que el vapor que entra en el tubo no ha tenido la oportunidad de completar el mecanismo que produce las partículas sólidas de carbón en la zona luminosa.

Si se levanta el extremo del tubo que está en contacto con la llama hasta la zona luminosa, saldrá hollín en lugar de vapor por el otro extremo. El tubo no recoge ya hidrocarburos vaporizados



Procesos que tienen lugar en una llama

sino que está desviando algunas partículas sólidas de carbón procedentes de la zona luminosa. Las partículas de carbón salen del tubo en su forma natural –es decir– hollín, ya que no han tenido la oportunidad de ser consumidas por la reacción del agua y el dióxido de carbono.

Cualquier obstáculo, sobre todo si es frío, colocado en la zona luminosa puede provocar que se forme hollín porque el obstáculo interrumpe el consumo de las partículas sólidas de carbón. Se puede hacer la prueba con un clip de papel enderezado: éste se cubrirá inmediatamente de hollín. Si se coloca un trozo de tela metálica en la zona amarilla, ésta puede obstruir completamente la combustión de las partículas de carbón y evitar que la llama llegue más arriba de la tela metálica.

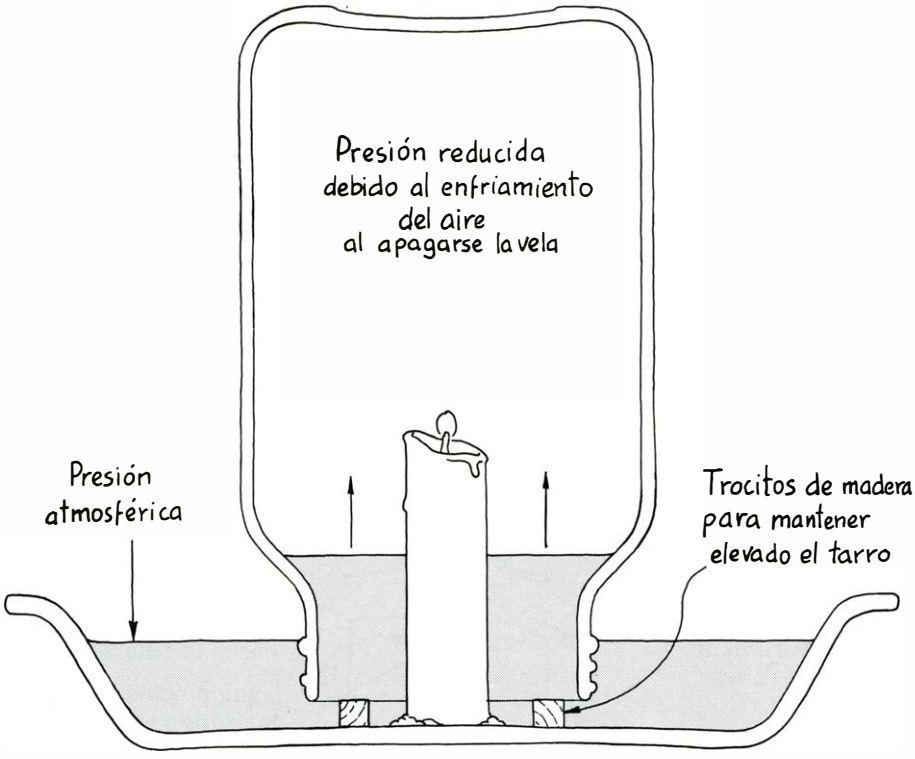
En otra demostración, Faraday se propuso descubrir la combustibilidad de los hidrocarburos vaporizados. Para ello hay que apagar de un soplo rápido la llama de la vela, sin variar la corriente de vapor blanco que sale después de apagarse. Coloquemos una cerilla encendida sobre la mecha en la corriente ascendente. Si esto se hace a tiempo, la llama arderá hacia abajo y volverá a encerder la vela. Cuando se apaga la vela de un soplo, parte de la cera continúa vaporizándose por los gases calientes y la mecha. Esta corriente ascendente de vapor es combustible.

Intenté encender el vapor después de haber vertido cera fundida dentro de un pequeño recipiente de pyrex, colocando a éste en un hornillo eléctrico hasta que podía apreciarse desprendimiento de vapor. La llama se encendió dentro del recipiente, pero desapareció pronto debido a la falta de oxígeno en los estrechos confines del recipiente. El vapor que sube de la mecha en la llama de una vela es combustible, pero no arde ni emite luz porque falta oxígeno en ese punto. Por eso, en la zona que está inmediatamente encima de la mecha la llama es obscura.

La llama solamente produce luz cuando se forman las partículas sólidas de carbón y se hacen incandescentes.

Se puede demostrar el rápido consumo de pequeñas partículas, tales como las de carbón en la zona luminosa, echando por medio de un pulverizador polvo combustible fino a la llama de la vela. Faraday usó polvo de licopodio. Pero se puede usar también harina tamizada.

Cuando se sopla ligeramente el polvo a través de la llama, arde en seguida con un chisporroteo apreciable. Si se lanzaran las partículas de harina sin tamizar la llama, no arderían con tanta facilidad y es posible que no ardieran en absoluto. Los granos más pequeños arden mejor porque tienen una mayor superficie al descubierto. Este efecto implica un grave peligro en las minas y plantas industriales que tienen una gran cantidad de finas partículas de polvo en el ambiente. En un ambiente de este tipo, una



El experimento de la jarra invertida

chispa fortuita puede causar una combustión extremadamente rápida que provocaría una violenta explosión.

La distribución de la temperatura en la llama de una vela puede ser demostrada de forma aproximada atravesando la llama con una hoja de papel y fijándose en las zonas ennegrecidas del mismo justo antes de que empiece a arder. Estas zonas negras aparecen más o menos formando un círculo alrededor del centro de la llama de la vela, lo cual indica que el centro de la llama está más frío que el borde exterior.

Traté de poner obstáculos al mecanismo de mi vela, protegiendo la punta de parafina con una lámina de aluminio para bloquear el calor emitido por la llama. Como era de esperar, la cera fluyó a lo largo de la mecha reducida y la llama palideció. Podía haber obtenido el mismo resultado si hubiera cubierto la parafina con un filtro de infrarrojos, es decir, un filtro que bloqueara la radiación infrarroja pero que dejara pasar la radiación visible, porque casi toda la radiación de la vela es de rayos infrarrojos. Menos del 0,4 por ciento del calor es radiado en forma de rayos ultravioleta o visibles.

El efecto de los campos eléctricos en las llamas de las velas ha sido descubierto hace mucho tiempo. Para comprobarlo coloqué mi vela entre los polos opuestos de la máquina de Wimshurst, el antiguo generador manual de electricidad estática de alto potencial. La llama era atraída hacia el polo negativo y repelida por el polo positivo.

Parece ser que cuando la llama está en el campo eléctrico que está situado entre los polos, los electrones libres de la llama son desviados hacia el polo positivo, pero debido a que el observador no puede ver la corriente de electrones, el efecto no es observable. Sin embargo, la llama queda cargada con gran abundancia de iones positivos, los cuales son relativamente pesados y menos móviles que los electrones. La llama cargada positivamente es repelida entonces por el polo positivo y atraída por el negativo.

El agua es uno de los productos que se libera en la quema del hidrógeno por el combustible vaporizado. Esta se puede recoger pasando una cuchara fría sobre la parte alta de la llama, teniendo cuidado de evitar que se acumule hollín. Para medir la cantidad de agua se puede poner un embudo sobre la llama y recogerla en un recipiente frío por medio de un tubo de goma. Quizás el observador quiera medir cuánta agua se produce por una cantidad determinada de consumo de la vela.

Una demostración común relacionada con la quema de una vela se ha interpretado a veces erróneamente. Coloquemos una vela en el fondo de un cazo fijándola con unas gotas de cera caliente. Después, se vierte agua dentro del cazo hasta una altura aproximada de un cuarto de la altura de la vela. Se enciende la vela y se pone una jarra transparente grande invertida sobre ésta. La boca de la jarra deberá estar sumergida en el agua, pero sin llegar al fondo del cazo (se puede colocar en esta posición con soportes de madera, por ejemplo) para permitir que el agua pase al interior de la jarra. El nivel del agua subirá de forma clamorosa hasta llegar quizás a cubrir la vela: ello se debe a que la llama de la vela consume el oxígeno existente dentro de la jarra invertida y ésta acaba por apagarse.

Este efecto se ha atribuido a veces, erróneamente, a la pérdida del oxígeno del aire cerrado a medida que se va quemando la vela. Pero esa no puede ser la razón, porque la quema en sí libera gases y vapores, sobre todo dióxido decarbono y agua. La subida del nivel del agua se debe en realidad al enfriamiento del aire contenido en el interior de la jarra, a medida que la llama de la vela se debilita y se apaga. Cuando se pone la jarra sobre la vela, el aire que queda en su interior está caliente y se dilata; parte del mismo puede incluso fugarse formando burbujas por debajo del borde sumergido de la jarra. A medida que la llama se debilita, el aire se va enfriando y se contrae, por lo que la presión atmosférica del exterior de la jarra empuja el agua hacia arriba dentro de la misma.

Se pueden demostrar los posibles tipos de llama de una vela, desde la que apenas se mantiene encendida porque recibe poco combustible hasta la llama que echa abundante humo porque tiene demasiado combustible. Esto se consigue poniendo en varias velas mechas de distintos tamaños en cada una. Para ahorrar tiempo, usé una vela llamada "contravela", la cual consiste en una mecha introducida en un soporte de plástico que flota en el combustible, que puede ser aceite vegetal. El soporte flotante posee dos compartimentos; la parte central, agujereada, permite el flujo del aceite por la mecha. La sección exterior no tiene agujeros, lo que evita que la plataforma se hunda. Cuando la mecha está encendida, el aceite sube por ella, se vaporiza y se quema produciendo llama.

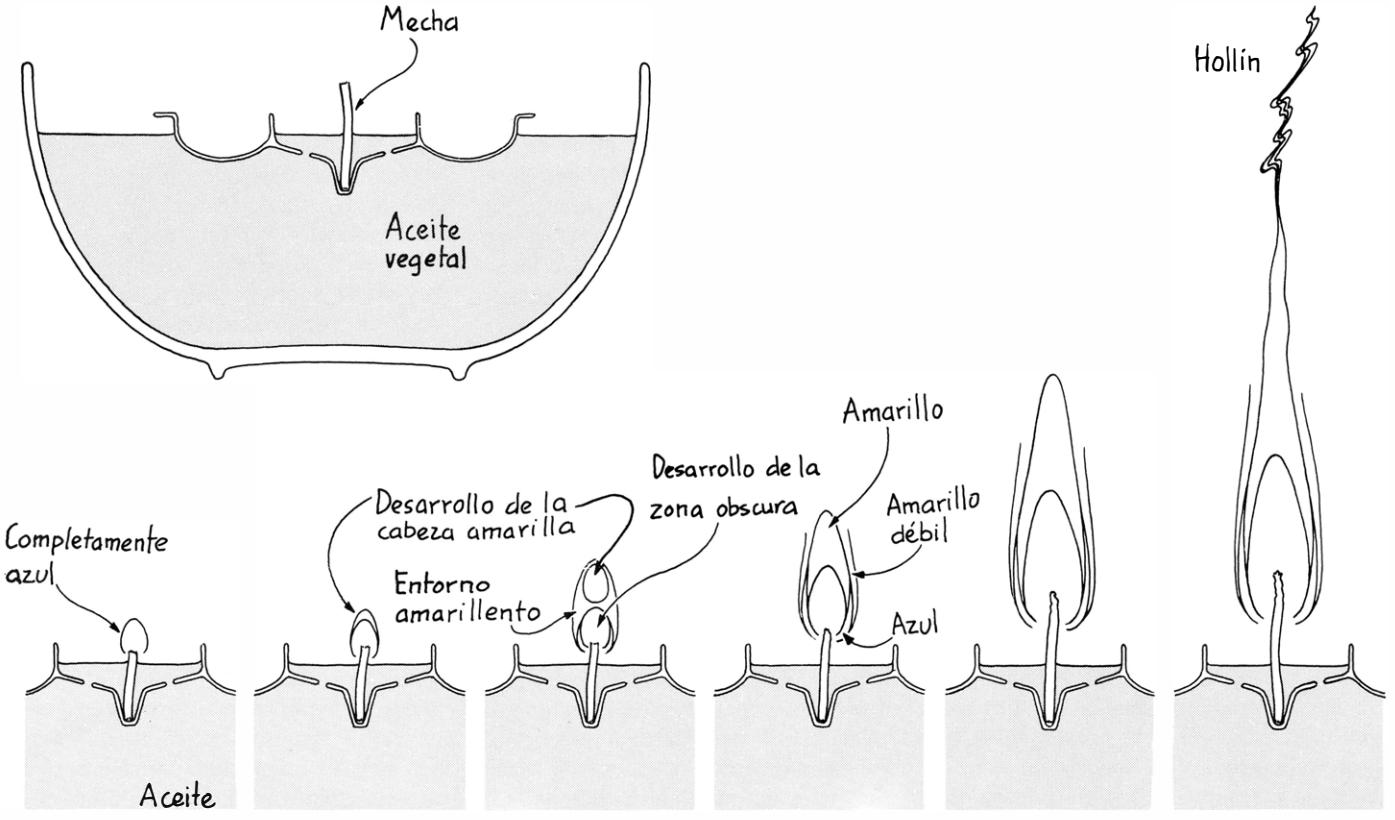
Si se empuja ligeramente la plataforma hacia abajo, la llama se debilita. Si se levanta, también ligeramente, la llama se aviva y lo hace con tanta intensidad que produce hollín. Con un tapón de plástico, puede construirse, seguramente, una plataforma flotante. Haya hecho usted su propia vela, la compre o fabrique una serie de ellas con distintas mechas, contemple las características de las llamas.

La llama más débil es una zona de

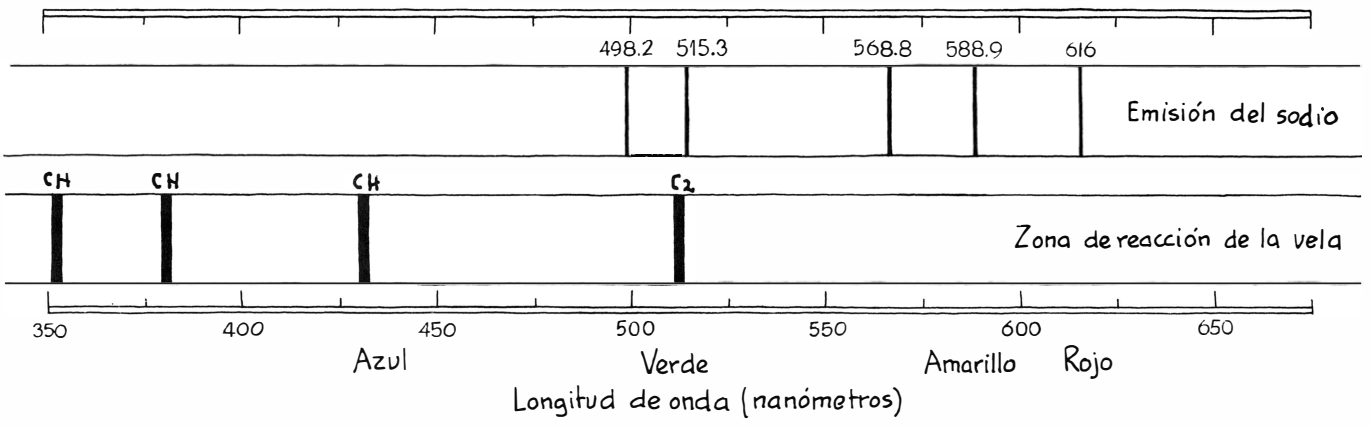
reacción y, por ello, sólo tiene luz azul. En una llama más fuerte la zona de carbón luminosa empieza encima de la zona de reacción o justo dentro de ésta y asciende hasta dividir en dos la zona de reacción. En una llama más alta, la zona azul de reacción está alrededor de la base y la parte alta de la zona de carbón luminosa está directamente expuesta al aire exterior. De hecho, la llama asciende tanto que la zona interior de la parte de carbón luminosa se enfría; así pues, las partículas de carbón ya no se consumen cuando alcanzan la parte alta de la llama y luego se liberan en forma de hollín.

Comprobé el espectro de mi vela con una rejilla de difracción de bajo coste y con un prisma de cristal. La zona de carbón luminosa dominaba la emisión de luz y vi un espectro completo desde el rojo al azul obscuro, sin ninguna apariencia de emisiones moleculares. Para ver la emisión del C_2 y el CH tuve que usar un espectrómetro del tipo de los que se emplean en las clases introductorias de física. La luz de la vela entraba por una estrecha ranura y era dirigida por una lente hacia la rejilla de difracción o al prisma, los cuales la desviaban y dispersaban mostrando distintos colores. El espectrómetro tenía un telescopio móvil con el cual se podía examinar la luz dispersada.

Cuando permití que la luz procedente de la zona luminosa de carbón entrara por la ranura, volví a ver de nuevo un espectro completo. Cuando permití que entrara por la ranura sólo la luz procedente de la zona azul de reacción de un lado de la llama, el espectro completo de las partículas incandescentes no era tan brillante y pude distinguir varias emisiones de moléculas. Una vez que descubrí las posiciones angulares de estas emisiones pude calibrar el espectro de colores en términos de longitudes de onda al quitar la vela y sustituirla por una lámpara de sodio, observando así las posiciones angulares de las emisiones del sodio. Las longitudes de onda de las emisiones de sodio aparecen en libros de consulta. Así pude identificar las emisiones moleculares procedentes del C_2 y CH calculando las longitudes de onda relacionadas con las posiciones angulares que yo había registrado y relacionándolas con otros trabajos que incluían las longitudes de onda procedentes de estas mismas moléculas.



Diversos tipos de llamas



Espectros desde la emisión de una lámpara de sodio hasta la de la llama de una vela

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

ENERGIA NUCLEAR, ARMAS ATOMICAS Y ESTABILIDAD INTERNACIONAL

NUCLEAR POWER ISSUES AND CHOICES. Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, 1977.

THE NATIONAL ENERGY PLAN. Executive Office of the President: Energy Policy and Planning. Government Printing Office, 29 de abril de 1977.

NUCLEAR PROLIFERATION AND SAFEGUARDS. Office of Technology Assessment, Congress of the United States, junio, 1977.

LA ESTELA DE CELULAS EN MOVIMIENTO

COLD SPRING HARBOR CONFERENCES ON CELL PROLIFERATION, VOL. 3, BOOKS A, B AND C: CELL MOTILITY. Dirigido por R. D. Goldman, T. D. Pollard y J. L. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Laboratory, 1976.

DAUGHTER 3T3 CELLS: ARE THEY MIRROR IMAGES OF EACH OTHER? Guenter Albrecht-Buehler en *The Journal of Cell Biology,* vol. 72; 595-603; 1977.

THE PHAGOKINETIC TRACKS OF 3T3 CELLS. Guenter Albrecht-Buehler en *Cell,* vol. 11, n.º 2, págs. 395-404; Junio, 1977.

LOS INSECTOS DE LA SUPERFICIE DEL AGUA

COMMUNICATION BY SURFACE WAVES: MATING BEHAVIOR OF A WATER STRIDER (GERRIDAE). R. Stimson Wilcox en *Journal of Comparative Physiology,* vol. 80, págs. 255-266; 1972.

CAN *HALOBATES* DODGE NETS? II: BY MOONLIGHT? Lanna Cheng y James T. Enright en *Limnology and Oceanography,* vol. 18, págs. 666-669; 1973.

THE MECHANORECEPTIVE SYSTEM OF PREY LOCALIZATION IN *NOTONECTA,* II: THE PRINCIPLE OF PREY LOCALIZATION. Konrad Wiese en *Journal of Comparative Physiology,* vol. 92, págs. 317-325; 1974.

EL NACIMIENTO DE ESTRELLAS DE GRAN MASA

SEVERAL H II REGIONS IN THE NEAR INFRARED. M. Beetz, H. Elässer, C. Poulakos y R. Weinberger en *Astronomy and Astrophysics,* vol. 50, n.º 1, págs. 41-46; 1 de julio de 1976.

SHOCK-DRIVEN IMPLOSION OF INTERSTELLAR GAS CLOUDS AND STAR FORMATION. Paul R. Woodward en *The Astrophysical Journal,* vol. 207, n.º 2, parte 1.ª, págs. 484-501; 15 de julio de 1976.

SEQUENTIAL FORMATION OF SUBGROUPS IN OB ASSOCIATIONS. Bruce G. Elmegreen y Charles J. Lada en *The Astrophysical Journal,* vol. 214, págs. 725-741; 1977.

COMO COMPARTIAN SU ALIMENTO LOS HOMINIDOS PROTOHUMANOS

EARLIEST MAN AND ENVIRONMENTS IN THE LAKE RUDOLF BASIN: STRATIGRAPHY, PALEOECOLOGY AND EVOLUTION. Dirigido por Yves Coppens, F. C. Howell, Glynn Ll. Isaac y Richard E. F. Leakey. University of Chicago Press, 1976.

HUMANKIND EMERGING. Dirigido por Bernard G. Campbell. Little, Brown & Company, 1976.

HUMAN ORIGINS: LOUIS LEAKEY AND THE EAST AFRICAN EVIDENCE. Dirigido por Glynn Ll. Isaac y Elizabeth R. McCown. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

CIRUGIA MICROVASCULAR EN EL ICTUS CEREBRAL

EXPERIMENTAL AUGMENTATION OF REGIONAL CEREBRAL BLOOD FLOW BY MICROVASCULAR ANASTOMOSIS. Jack M. Fein y G. Molinari en *Journal of Neurosurgery,* vol. 41, págs. 421-426, 1974.

MICROVASCULAR ANASTOMOSIS FOR CEREBRAL ISCHEMIA. Dirigido por Jack M. Fein y O. H. Reichman. Springer-Verlag, en prensa.

MICROVASCULAR NEUROSURGERY-1977. Dirigido por Jack M. Fein. The C. V. Mosby Company, en prensa.

CHIMENEAS DE KIMBERLITA

MODEL OF A KIMBERLITE PIPE. J. B. Hawthorne en *Physics and Chemistry of the Earth,* vol. 9, págs. 1-15; 1975.

SUB-CRATONIC CRUST AND UPPER MANTLE MODELS BASED ON XENOLITH SUITES IN KIMBERLITE AND NEPHELINITIC DIATREMES. John B. Dawson en *Journal of the Geological Society, London,* vol. 134, parte 2.ª, págs. 173-184; noviembre, 1977.

¿COMO SE SEGREGA LA INSULINA?

THE ROLE OF THE EXOCRINE PANCREAS IN THE STIMULATION OF INSULIN SECRETION BY INTESTINAL HORMONES. R. Goberna, R. D. Fussganger, S. Raptis, M. Telib y E. F. Pfeiffer en *Diabetologia,* 7, 68, 1971.

GASTROINTESTINAL HORMONES AND ISLET FUNCTION. XVI NOBEL SYMP. E. F. Pfeiffer, M. Frank, R. Fussganger, R. Goberna, M. Hinz y S. Raptis. Editado por E. Almquist y F. Wirsell, 1973.

ACTION OF B-HYDROXY BUTYRATE, ACETOACETATE AND PALMITATE ON THE INSULIN RELEASE IN THE PERFUSED ISOLATED RAT PANCREAS. R. Goberna, J. Tamarit, J. Osorio, R. Fussganger y E. F. Pfeiffer en *Horm. Metab. Res.,* 6, 256, 1974.

INSULIN II. Editado por A. Hasselblatt y F. Bruchhausen. Springer-Verlag 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

NOISE: SOURCES, CHARACTERIZATION, MEASUREMENT. A. van der Ziel. Prentice-Hall, 1970.

"1/*F* NOISE" IN MUSIC AND SPEECH. Richard F. Voss y John Clark en *Nature,* vol. 258, n.º 5533, págs. 317-318; 27 de noviembre de 1975.

"1/*F* NOISE" IN MUSIC: MUSIC FROM 1/*F* NOISE. Richard F. Voss y John Clark en *The Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 63, n.º 1, págs. 258-263; enero, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

CREATIVE CANDLEMAKING: FROM THE SIMPLE BASIC CANDLE TO THE MOST INTRICATE SCULPTURAL FORM. Thelma R. Newman. Crown Publishers, Inc., 1972.

FLAMES: A STUDY IN MOLECULAR SPECTROSCOPY. Richard A. Ashby en *Journal of Chemical Education,* vol. 52, n.º 10, págs. 632-637; octubre, 1975.

Taller y laboratorio

Lo que los penachos de humos nos dicen sobre las características de la atmósfera

Jearl Walker

La observación de los penachos de humo en el cielo puede ser, a la vez, interesante e instructiva. Es mucho lo que se puede aprender en tal espectáculo sobre cómo varía la temperatura de la atmósfera con la altura. Los penachos de humo adoptan gran variedad de formas, determinadas principalmente por la diferencia de temperatura existente entre el aire de la superficie y el que se encuentra un poco más arriba que la chimenea.

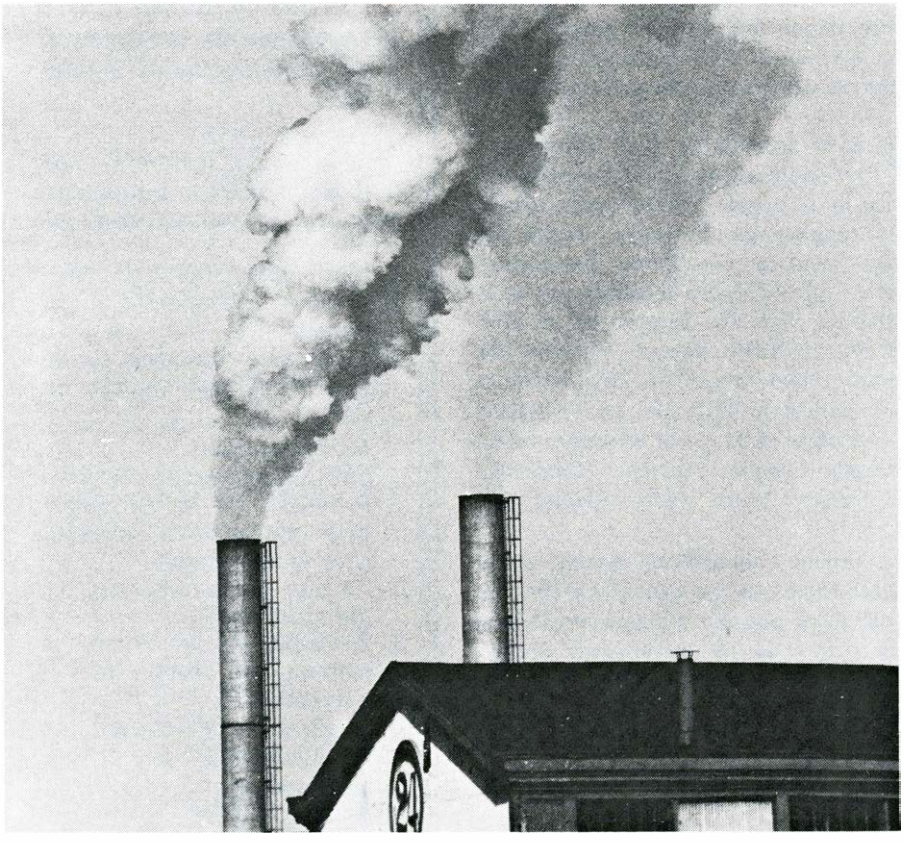
Hay dos tipos básicos de penachos de humo: el de salida a chorro ("momentum jet"), en el cual el impulso hacia arriba del penacho se debe a su propia cantidad de movimiento inicial, y el penacho flotante; éste sube o baja según sea la relación entre su temperatura y la del aire. En los días con viento en calma, ambos tipos de penacho se elevan tomando la forma de un cono vertical invertido, que se va agrandando y cuyo vértice se halla muy cerca de la boca de la chimenea (suponiendo, en el caso del penacho flotante, que el gas que lo forma esté suficientemente caliente). En estos conos, tanto en uno como en otro tipo de penacho, la velocidad es mayor en el eje central del cono y va disminuyendo en dirección hacia el exterior.

Podemos establecer una diferencia entre ambos tipos de penachos: el de salida a chorro puro tiene un ángulo en el vértice del cono de aproximadamente 24 grados, mientras que el flotante puro tiene un ángulo en el vértice de 18 grados, también aproximadamente. No he podido dar con una explicación sencilla y a la vez convincente de tal divergencia. Las cifras anteriores se han deducido a partir de la observación de muchos penachos. Fotografiando un penacho vertical en un día de calma y luego midiendo el ángulo del cono en la fotografía, se puede determinar qué tipo de penacho es el que hemos observado. Si el ángulo es menor de 18 grados, ello se debe a que hay una corriente vertical ascendente, próxima a la chimenea, que hace que el penacho ascienda más rápidamente y, por tanto, hace decrecer el ángulo de su cono.

Un penacho es flotante (y por tanto asciende) si los gases que lo forman están más calientes que el aire a su misma altura, aunque también intervienen otros efectos físicos. Dado que la presión atmosférica decrece con la altura, toda porción de gas del penacho que ascienda debe expandirse al subir. La energía necesaria para expandirse la toma de la energía de las moléculas que lo forman, y no de ninguna fuente exterior. Esta energía interna es la energía cinética de las moléculas en su movimiento arbitrario.

La temperatura de un gas nos da una medida de su energía interna; mientras mayor sea su temperatura, mayor será la energía cinética de sus moléculas. Si parte de dicha energía se ha consumido en aumentar el volumen del gas, su temperatura habrá descendido necesariamente. Dicho cambio de temperatura, que no implica un intercambio de calor con el medio que rodea al gas, recibe el nombre de cambio adiabático. Por tanto, toda porción de gas, al ascender en un penacho de una chimenea, se expande enfriándose adiabáticamente. De igual manera, si se obliga a descender a una porción de gas de un penacho, ésta se contraerá y se calentará adiabáticamente conforme el aire que la rodea actúe sobre ella haciéndola bajar.

En un gas que sale por una chimenea, la continuación o no de su ascensión dependerá del cambio que experimente la temperatura del aire ambiente en relación con la altura. Por ejemplo, si un penacho al salir se enfría, pero aún así sigue siendo más caliente que el aire ambiente, continuará ascendiendo de forma acelerada. Por otra parte, si el gas llega a ponerse más frío, en su ascensión, que el aire que lo rodea, detendrá su ascenso



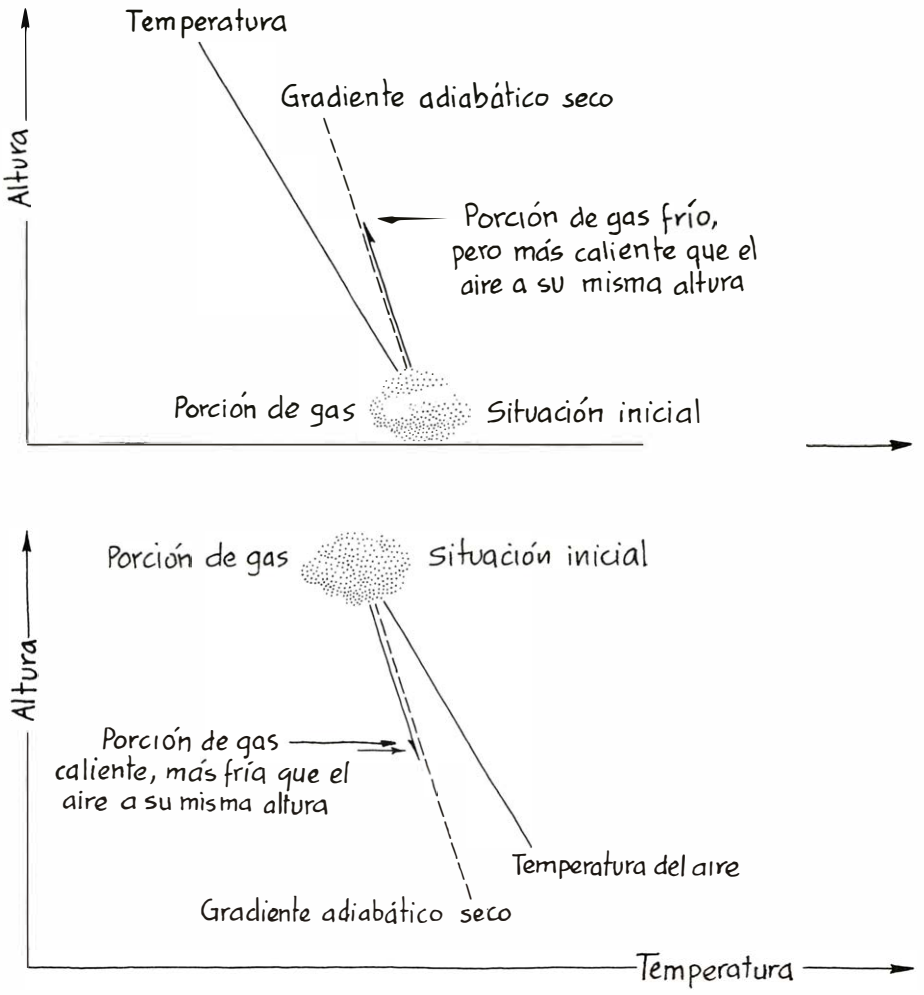
Un penacho de humo tipo vórtice o remolino

y comenzará a bajar. Si la temperatura se iguala, el penacho subirá a velocidad constante.

Cuando un gas se mueve inicialmente hacia abajo, se calienta adiabáticamente, pero su temperatura puede ser superior, inferior o igual que la temperatura del aire ambiente en cada momento, dependiendo de cómo cambie la temperatura del aire en relación con la altura. En el momento en que la temperatura del gas sea mayor que la temperatura del aire, detendrá su descenso. Mientras sea menor, el descenso proseguirá incluso de forma acelerada. Si la temperatura es la misma, continuará descendiendo pero a velocidad constante. Muchas de las formas características de los penachos que se pueden observar dependen de esta interrelación entre la ascensionalidad y las relaciones de enfriamiento o calentamiento en consecuencia de cómo varíe la temperatura de la atmósfera en relación con la altura.

Toda porción de gas de un penacho de humo cambia su temperatura adiabáticamente –lo mismo al subir que al bajar– a razón de un grado Celsius por cada 100 metros de variación de la altura, aproximadamente. Esta razón se llama gradiente adiabático seco; la palabra "seco" indica que no se produce condensación. Dependiendo de las condiciones atmosféricas y de las fuentes de calor de los alrededores, la temperatura del aire puede descender con la altura más o menos rápidamente, o incluso en la misma proporción en que lo hace el gradiente adiabático seco de temperatura. Cada uno de los tipos anteriores de variación es un ejemplo de un gradiente negativo para el aire, debido a que su temperatura, en cada uno de los casos, decrece con la altura. Sin embargo, la temperatura del aire puede llegar a crecer con la altura; es lo que se llama inversión térmica. El aire tiene entonces un gradiente positivo.

Si los gases están húmedos, el gradiente puede cambiar. La razón es que, conforme el gas se enfría, su humedad relativa se hace mayor; una vez que se alcanza el 100 por ciento de humedad, cualquier enfriamiento posterior provoca la condensación en forma de pequeñas gotitas de una parte del vapor de agua existente en el gas. El cambio de estado, de pasar de vapor a líquido, libera energía y evita que esta porción de gas se enfríe tan rápidamente como lo hubiese hecho de no existir el efecto de condensación. En otras palabras, parte de la energía necesaria para la expansión del gas se toma ahora del cambio de estado del agua, y, por tanto, se gasta menos cantidad de la energía interna del gas. La velocidad media a la cual una porción ascendente de gas cambia su temperatura con la altura se llama gradiente adiabático saturado. Cuando un gas húmedo comienza a ascender, se va enfriando de acuerdo con su gradiente adiabático seco, hasta que comienza a producirse la condensación; a partir de entonces, seguirá enfriándose, pero ya según el gradiente adiabático saturado. Esta variación en el ritmo o velocidad de enfriamiento afecta a los penachos húmedos del tipo de los que emiten las centrales térmicas; en ellos, los gases no se enfrían tan rápidamente mientras asciende como lo hacen en los penachos secos.

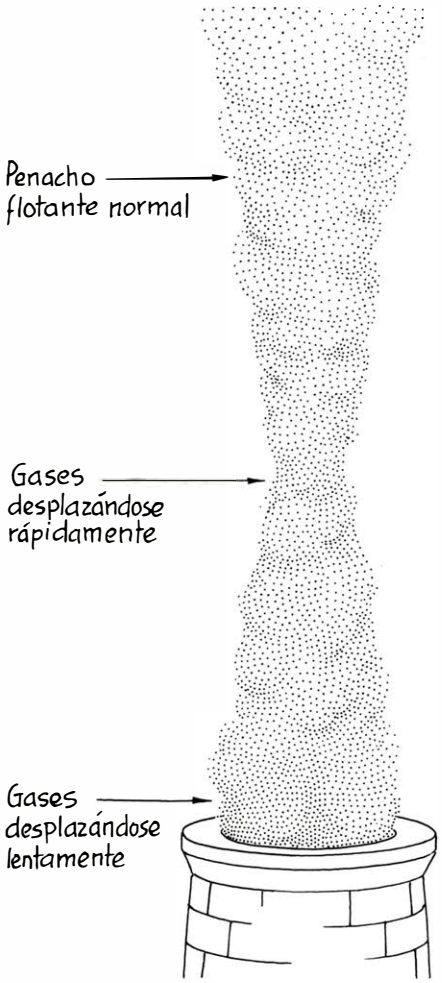


Comportamiento de una porción de gas al ascender (**arriba**) *o al descender* (**abajo**)

Cabe la posibilidad de que un penacho de los de salida a chorro, al expansionarse un tanto, se comporte básicamente como un penacho flotante. Existe otro tipo de penachos que se forman en los días de calma, y que a mí me resultan extraños. Son los que tienen una velocidad inicial de los gases muy pequeña, lo cual puede ocurrir cuando en las chimeneas caseras existe una abertura demasiado grande; por tanto, el penacho no se expande inicialmente como un cono sino que se contrae hasta que la velocidad ascensional se incrementa suficientemente y, a partir de entonces, se expansiona como un penacho flotante normal.

Se puede ver un ejemplo similar, aunque invertido, de este estrangulamiento en el fregadero de la cocina. La corriente de agua, al salir del grifo, cae, aumenta su velocidad y se estrecha. Este estrechamiento no se debe a la presión atmosférica, ya que dicha presión permanece constante a todo lo largo de la caída del agua.

Para ponerlo más claro imaginemos una sección transversal de la corriente de agua cerca de la salida del grifo y otra un poco más abajo. Cada segundo pasa una determinada cantidad de agua a través de la sección superior. La misma cantidad deberá pasar también por la sección inferior en el mismo tiempo; de lo contrario, tendríamos que, por arte de magia, cierta cantidad de agua aparecería o desaparecería entre los dos niveles. Puesto que la velocidad a través de la sección inferior es mayor, el agua necesita menor sección de paso para que



Un penacho flotante y convergente

fluya la misma cantidad cada segundo. La corriente, por tanto, se estrecha.

Los gases calientes al salir por una chimenea con poca velocidad no pueden expandirse de la misma forma que lo haría un penacho flotante; y ello porque la forma típica del cono requiere una determinada relación entre la velocidad inicial y la flotabilidad. Como consecuencia, los gases se elevan primero como un chorro, aceleran luego su ascenso merced a su flotabilidad y contraen su anchura conforme aumenta su velocidad. Cuando hayan alcanzado una velocidad suficiente como para conseguir la relación requerida, el penacho se expandirá formando un cono. En los días con viento en calma puede ser divertida la búsqueda y observación de penachos convergentes en las chimeneas de las casas o en las fogatas.

Para ver los penachos flotantes más bonitos hay que esperar los días de viento suave y constante, que inclina o dobla los penachos por la parte superior. Cuando han terminado de subir, descienden, se dispersan hacia arriba y hacia abajo, adoptan una forma alargada o forman bucles, según varíe la temperatura del aire de la zona en relación con la altura y según la fuerza del viento en dicha zona. La ilustración de la página siguiente muestra una amplia gama de penachos típicos junto con la variación de la temperatura del aire según la altura que se requiere para cada uno de ellos. El gradiente adiabático seco de temperatura también aparece allí, pero esa línea se puede mover hacia la derecha o hacia la izquierda. La gráfica indica la relación entre el cambio de temperatura y el cambio de altura para una porción de gas de un penacho. Es necesario conocer la temperatura del gas en algún punto determinado (por ejemplo, la parte alta de la chimenea) para que esta línea pueda representar la temperatura del gas en función de la altura. La gráfica entonces habría que moverla a la derecha o a la izquierda para que diera justo esa temperatura a esa altura.

Si la temperatura del aire decrece con la altura algo menos rápidamente de como lo hace el gradiente adiabático seco de temperatura del gas, se limita la ascensión al encorvamiento del penacho por su parte superior, y desciende. Un ascenso enfriaría adiabáticamente el gas con la consecuencia inmediata de que dicho ascenso se detendría. Un descenso calentaría el gas adiabáticamente, con lo que también el descenso se detendría. Aunque el perfil de temperatura de la atmósfera esté suficientemente cerca del gradiente adiabático, el penacho se va expandiendo gradualmente produciendo la llamada forma "de cono".

Por el contrario, cuando la temperatura de la atmósfera decrece mucho más rápidamente con la altura que el gradiente adiabático seco (a dicha forma de variación se le llama gradiente superadiabático), el calor de la chimenea o del suelo puede provocar grandes remolinos térmicos, suficientes como para atrapar el penacho y hacerlo girar y formar ondas hacia arriba y hacia abajo. Estas circunstancias ocurren en días cálidos, cuando el suelo absorbe rápidamente una cantidad de calor solar antes de que el aire circulante pueda llevárselo. Los remolinos nunca se forman cuando hay viento fuerte, que enfría el suelo, o éste se halla cubierto de nieve.

Si la temperatura del aire tiene un gradiente positivo, es decir, si dicha temperatura se incrementa con la altura, formando una inversión térmica, el penacho se limita a ser una fina corriente de gas que se abre en abanico, cuyo vértice estaría en la chimenea. Cuando una parte de dicho penacho intenta subir, se enfría adiabáticamente poniéndose bastante más frío que el aire ambiente, por lo que su ascenso se frena de inmediato. De modo similar, si una parte del penacho intenta descender, se calienta adiabáticamente poniéndose más caliente que el aire ambiente y, por tanto, frenando su descenso de forma inmediata.

Cuando se produce una inversión térmica por debajo del vértice de la chimenea que impide los movimientos descendentes del humo, la figura que éste forma se la conoce por penacho en elevación. Este tipo de variación de temperatura suele darse al atardecer, cuando el suelo y la parte baja de la atmósfera han comenzado a enfriarse a medida que el sol se va escondiendo, mientras que la parte de la atmósfera próxima a la boca de la chimenea está aún relativamente caliente.

Fumigación es el término que se emplea para el fenómeno que ocurre cuando un gradiente positivo y negativo se dan a la vez con una inversión sobre la región donde el gradiente es negativo. La inversión impide que el penacho se difunda hacia arriba; al calentar entonces los humos el suelo, se provoca la aparición de remolinos que arrastran los humos hasta el mismo nivel de la superficie. Esta situación ocurre con frecuencia por la mañana, cuando el suelo y la parte baja de la atmósfera comienza a calentarse.

Un perfil de temperatura similar, pero cuyo gradiente sea menos empinado cerca del suelo, da lugar a un efecto sifón entre el nivel en el que esté la inversión y el suelo. El penacho se difunde hacia el suelo sin que sea necesaria la existencia de una gran turbulencia provocada por la mayor temperatura del suelo.

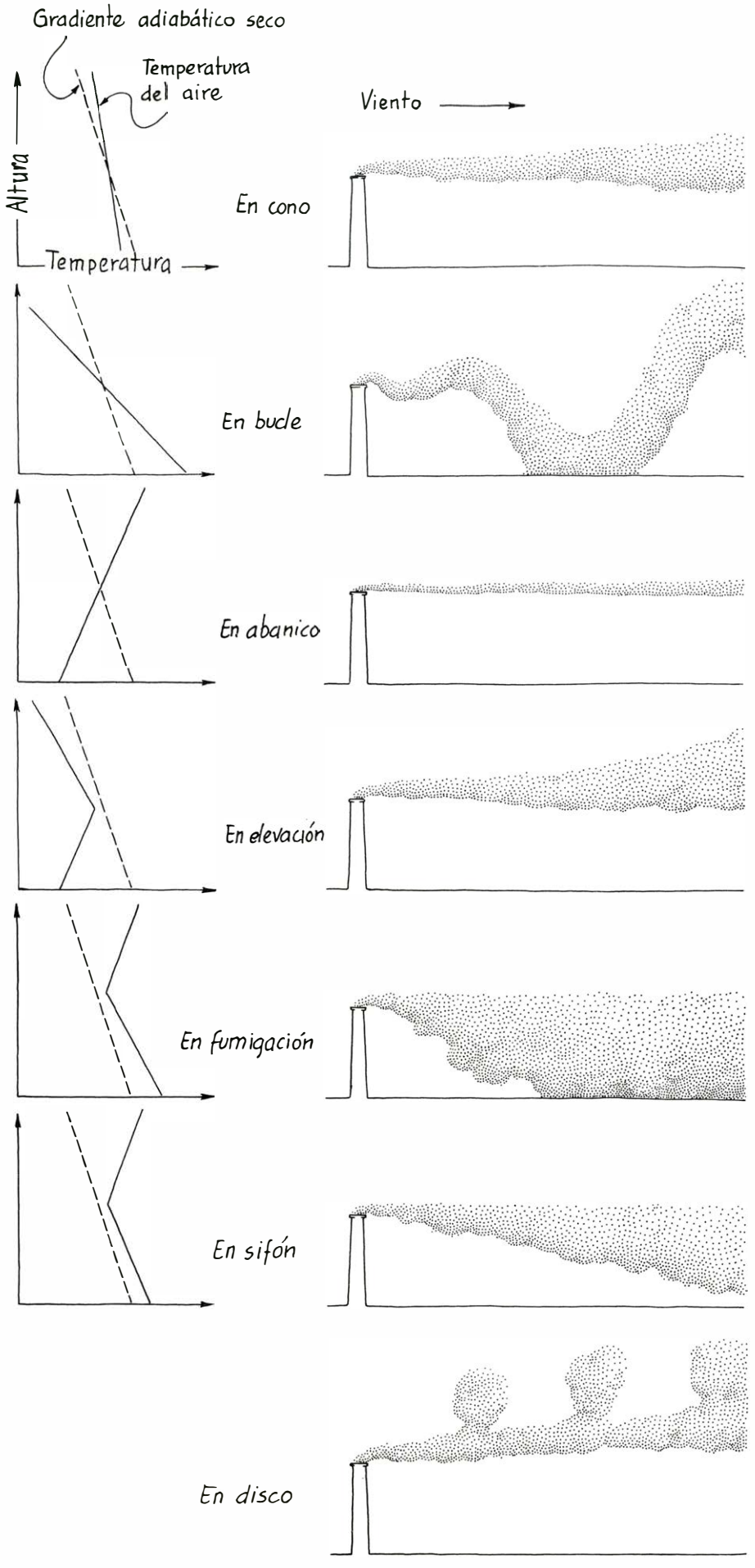
Mas si el penacho se produce en forma de cono o en elevación, puede ser lo suficientemente caliente como para lanzar hacia arriba chorros de aire caliente, dando lugar a que asciendan burbujas de aire caliente con forma de buñuelos, con un intenso movimiento ascendente por el centro y otro movimiento, más débil, descendente, por la parte de fuera. Tales corrientes, que se dan en las zonas de la atmósfera por encima de las fábricas, son aprovechadas por los pilotos para ganar altura.

La forma del penacho en cada uno de estos casos fundamentales puede modificarse si el humo abandona la chimenea con una gran cantidad de movimiento. Por ejemplo, si en las situaciones de fumigación o de sifón la capa con inversión térmica es relativamente delgada, un penacho con una cantidad de movimiento inicial suficiente puede penetrar en dicha capa en lugar de permanecer

confinado debajo de ella. En algunas localidades en donde se registra con frecuencia o de forma persistente la inversión térmica, suelen diseñarse sus chimeneas de suerte que, en su salida, los gases reciban una cantidad de movimiento suficiente como para que penetren en la capa de inversión antes de que el penacho se ponga horizontal. Así se reduce considerablemente la polución a nivel del suelo.

Las formas que adoptan los penachos, según sean húmedos o secos, divergen un tanto debido a que el gradiente adiabático es menos pronunciado una vez que el agua contenida en los gases comienza a condensarse. Algunos penachos, los que se producen en las centrales térmicas por ejemplo, son visibles gracias al agua que se condensa casi inmediatamente después de salir, produciendo una estela blanca. Sin embargo, la mezcla de los humos con el aire ambiente provoca rápidamente la evaporación, de ahí que la parte visible del penacho sea pequeña. En algunas ocasiones los humos o gases son lavados antes de salir por la chimenea, haciéndolos pasar por unas duchas que rocían agua con el fin de quitarles polvo o sustancias contaminantes. En esos casos, los gases, al salir por la chimenea, llevan realmente agua en estado líquido, de suerte que cuando el agua se evapora, al mezclarse los gases con el aire ambiente, el penacho se enfría en virtud del gasto de energía que ha sufrido en la evaporación. (Cuando nos secamos la piel soplando sobre ella, sentimos frío debido a que es el propio cuerpo el que suministra la energía necesaria para evaporar el agua haciéndola pasar del estado líquido a vapor.) Como resultado de este rápido enfriamiento, el penacho caerá, llegando al suelo probablemente muy cerca de la chimenea.

Si se observa y se va fotografiando el penacho de una chimenea a lo largo de un día completo, se verá cómo cambia a medida que el suelo se vaya calentando o enfriando. Al amanecer, la tierra y la parte baja de la atmósfera están frías; ello permite la formación de penachos en forma de abanico o en elevación. Conforme el suelo va absorbiendo energía solar, tanto éste como la capa inferior del aire se va calentando, y comienzan a formarse turbulencias. Esta cálida y turbulenta capa de aire se va haciendo cada vez más ancha, desarrollando las formas de fumigación o de sifón. Ambos efectos hacen que el penacho descienda hasta el nivel del suelo. Más tarde, cuando se ha calentado ya el aire de la zona superior, el penacho puede desarrollarse en forma de cono, pueden salir de él una especie de chorros en disco de aire o (si el calen-



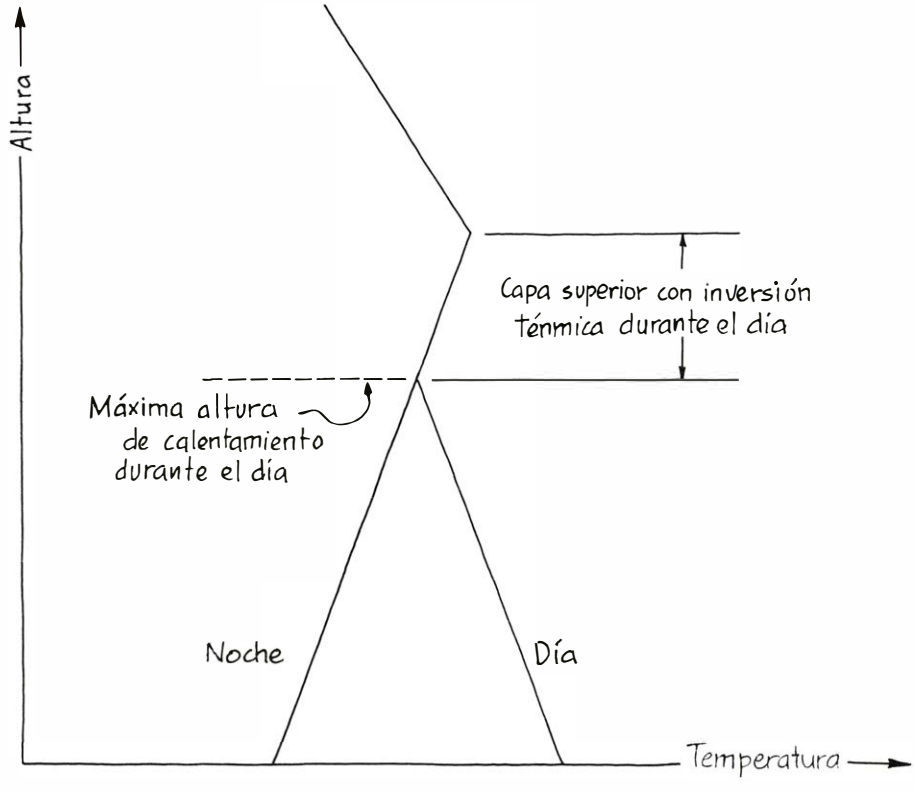
Tipos de penacho creados según la variación de la temperatura del aire con la altura

tamiento del suelo ha sido muy fuerte) puede adquirir forma serpenteada, en bucle. Después del mediodía, cuando la intensidad de los rayos del sol disminuye, y tanto el suelo como las capas bajas del aire comienzan a enfriarse por radiación, todos los penachos pueden constituir conos. Al anochecer, en la zona baja de la atmósfera se desarrolla una inversión debido al enfriamiento por radiación del suelo; el penacho comienza a adquirir forma de abanico o en elevación de nuevo.

Cabe la posibilidad de que alguien observe simultáneamente varias chimeneas de distintas alturas. En Cleveland puedo ver al menos una docena de chimeneas en un valle poco profundo, y poniéndome en un punto desde donde se domine el valle puedo comparar los tipos de comportamiento de los penachos de humo. Con una distribución apropiada de la temperatura, los penachos de humo emitidos por las chimeneas más altas pueden diferir de los emitidos por las más bajas debido a que los dos conjuntos de humo están en partes diferentes del perfil de temperatura atmosférica. Por ejemplo, las chimeneas altas pueden emitir humo a una zona con un gradiente negativo y mostrar un penacho en elevación, aun cuando las chimeneas más bajas emiten a la inversión y se extienden en forma de abanico. Si se observa un número suficiente de chimeneas se puede estimar dónde se produce el cambio de gradiente negativo a positivo. En días en que hay mucha inversión a baja altura se pueden ver algunos penachos de humo que "pinchan" la inversión mientras que otros se mantienen debajo.

Un penacho de humo puede adherirse a su chimenea. A veces la razón de esto es que el viento forma torbellinos y empuja el humo hacia abajo, a lo largo de la chimenea. Otras veces el descenso del humo puede estar motivado por la situación de la chimenea con relación a los edificios y columnas circundantes. Por ejemplo, si la chimenea está en el lado de sotavento de un gran obstáculo, el viento es obligado a ascender por mor del obstáculo y desciende después por el otro lado, haciendo que el humo también descienda. Si, por contra, la chimenea está en el lado de barlovento, es probable que el humo se eleve empujado por el flujo ascendente del viento.

Si la abertura de la chimenea es demasiado grande para la cantidad de gas que expulsa, y si esta expulsión es lenta, el humo saldrá a bocanadas. Unas veces la boca emitirá gas y humo de forma normal, otras el aire frío del exterior penetrará por la chimenea impidiendo la expulsión. Llegará un momento en que los gases calientes se unan de nuevo y consigan salir otra vez por la chimenea, produciendo otra bocanada de humo, hasta que se vuelva a repetir el proceso.



Variación diaria de la temperatura del aire con respecto a la altura

Si la chimenea expulsa un penacho flotante que no sufre mucha mezcla por turbulencia, éste se bifurcará casi inmediatamente. La velocidad es mayor en el centro del humo expulsado que en el exterior, lo que obliga al humo a circular formando dos torbellinos, de dirección ascendente en el medio y descendente en el exterior. Los dos torbellinos resultantes dividen el penacho de humo. Esto lo puede comprobar cualquier observador si tiene la oportunidad de acercarse a una chimenea que expulse un penacho flotante en un día de viento tranquilo y sin turbulencias. Deberá colocarse debajo del humo y levantar la vista para fijarse en su centro. Es probable que el movimiento envolvente sea bastante claro mientras se mira al humo saliendo y moviéndose hacia abajo. Y hasta puede verse el firmamento entre las dos corrientes.

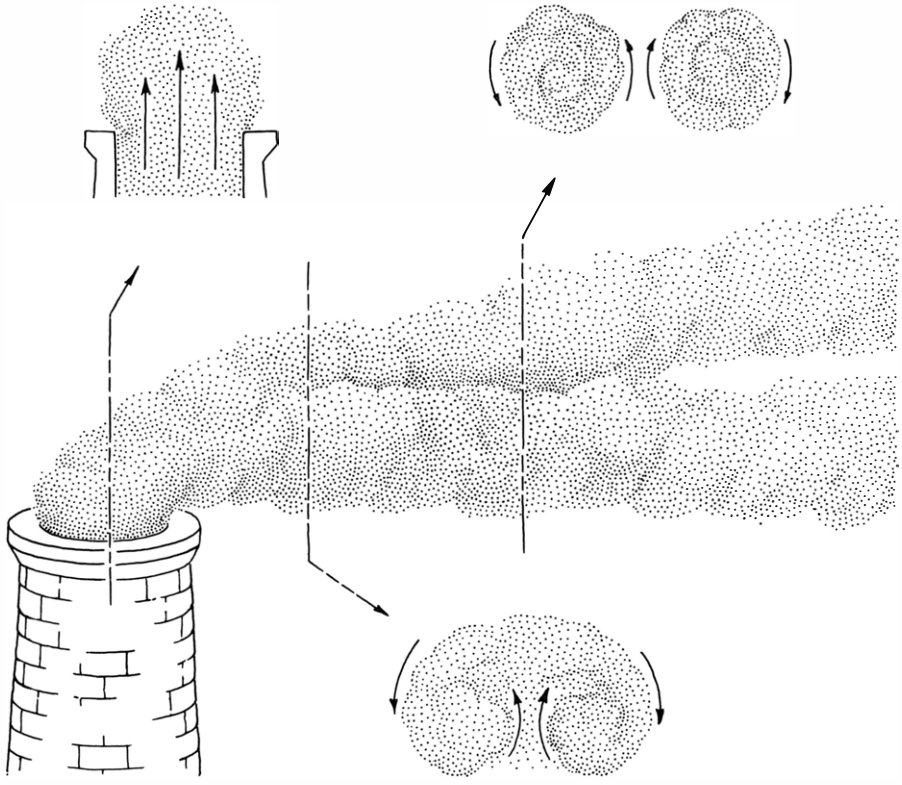
Para hacer un estudio serio del comportamiento del humo, debe intentarse relacionar la mezcla descendente del humo con la forma en que éste se mueve y con las condiciones del suelo situado debajo de éste. Por ejemplo, una chimenea puede emitir un humo que toma la forma de un abanico durante todo el tiempo que permanece sobre la zona del suelo que está relativamente fría y tiene pocos obstáculos para crear una turbulencia a gran escala. Si el penacho con forma de abanico pasa sobre una masa de agua, es probable que el agua y el aire que están entre ambos se hallen más calientes que la tierra. La turbulencia asociada con el agua y el aire más calientes produce fumigación, lo cual hace descender al humo hasta el nivel del agua. He visto chimeneas en Cleveland que emiten penachos finos de humo marrón que pasaban sobre el lago Erie, en donde se producía la fumigación y el material marrón descendía y se mezclaba al nivel del agua.

La fumigación puede desarrollarse también a partir de penachos en abanico si éstos pasan sobre fuentes de calor artificiales, como una ciudad por ejemplo. Allí el calor mezcla el aire hasta un nivel de unas tres veces la altura media de los edificios. Si el observador pudiera encontrar una chimenea humeante que fuera visible desde muy lejos, se podría ver el paso del humo desde la forma de abanico a la de fumigación, a medida que éste atraviesa una fuente de calor natural o artificial.

Los accidentes del terreno pueden afectar de otras formas al humo. Un valle estrecho puede ayudar a mantenerlo cerca del suelo si se desarrolla una inversión térmica sobre el aire frío atrapado en el valle. Cualquier penacho de humo que se cree debajo de la inversión

no podrá penetrar la capa de ésta y escapar a no ser que tuviera una cantidad de movimiento a la salida lo suficientemente alta para conseguir la penetración mientras se estuviera aún comportando como un penacho de salida a chorro.

Esta retención de humos nocivos en algunos valles ha ocasionado varios desastres. En el valle del Mosa, en Bélgica, se desarrolló una inversión en diciembre de 1930, reteniendo en la cuenca las emisiones de las acerías y de las plantas químicas. Como consecuencia de esto murieron 60 personas en tres días, la mayoría por fallo respiratorio; se contaron por miles las que contrajeron enfermedades graves. Es difícil creer que las autoridades, en lugar de interrumpir las emisiones, achacaran el incremento de diez veces en el número de muertes a una extraña y desconocida enfermedad, llegando incluso a sostener un biólogo que la causa era una plaga. Algún tiempo más tarde, se culpó a la polución industrial, pero se hizo muy poco para atajarla. En septiembre de 1972, el valle volvió a sufrir una inversión térmica que condujo de nuevo a la retención de la polución y fue causa de muchas enfermedades, aunque esta vez no mortales.



Un penacho dividiéndose en dos remolinos

La famosa niebla que caracterizó a Londres en otros tiempos se debía al abundante uso del carbón en las fábricas y en las casas, que vertían diariamente toneladas de anhídrido sulfuroso al aire. Al condensarse el agua en las partículas, se formaba una niebla espesa y marrón (la llamada "puré de guisantes"). En diciembre de 1952 se lanzaron a la atmósfera ambiente unas 2000 toneladas de anhídrido sulfuroso cada día, y se produjo una inversión térmica sobre el aire más frío del suelo que mantuvo retenido el humo de las casas y fábricas por debajo de ellas. Debido a la ausencia de viento que lo dispersara, el anhídrido sulfuroso se concentró sobre la ciudad durante cuatro días y cuatro noches, tornándose el cielo primero amarillo, después marrón y, finalmente, negro. A consecuencia directa de la polución murieron unas 4000 personas y otras 8000 murieron después por complicaciones respiratorias causadas por la fuerte inversión.

Si un observador dispone salir a observar el humo de las chimeneas, pero el día resulta ser demasiado lluvioso, puede quedarse en casa y examinar el humo procedente de un cigarrillo. Cerca de la punta encendida, la corriente de humo es uniforme y delgada, unos centímetros más arriba se rompe y forma remolinos para acabar dispersándose. Para distinguir esta transición hay que estar en una habitación al abrigo de corrientes de aire o en un tubo de vidrio grande abierto por ambos extremos. Cuando ascienden los gases procedentes de la punta encendida tienen mucha fuerza, porque están más calientes que el aire de la habitación. Sin embargo, dado que la velocidad inicial es relativamente baja, los gases calientes suben formando una corriente fina. Después de algunos centímetros, quizá de unos 30, la aceleración hacia arriba ha incrementado la velocidad hasta el punto en que la corriente se hace inestable y empieza a romperse y a formar remolinos.

En el agua que circula por las tuberías sucede una transición similar, que pasa de corriente laminar a turbulencia. Si el agua circula despacio (el significado de "despacio" depende del radio de la tubería y de la densidad y viscosidad del agua) se mueve con suavidad. Cada pequeña porción de agua fluye a lo largo de una línea paralela a la pared de la tubería. Pero a una determinada velocidad ya no fluye con la misma suavidad, sino que se mueve de manera inestable, se forman remolinos y cada pequeña cantidad de agua sigue una ruta irregular a lo largo de la tubería. Estos remolinos se pueden hacer visibles en una tubería transparente echando colorante al agua. En la corriente de humo producida por un cigarrillo, las partículas de éste nos permiten ver el curso seguido en su evolución.

Si el cigarrillo no tiene filtro, se puede notar una lenta corriente de humo que emerge del extremo no encendido. Esto es debido a que los gases que transportan el humo, después de haber pasado a lo largo del cigarrillo, se han enfriado, salen a la temperatura que reina en el ambiente, más o menos, y, por tanto, carecen de fuerza ascendente.

Los indios americanos usaban fogatas de humo para comunicarse entre grandes distancias. En el libro "Natural Aerodynamics", R. S. Scorer describe cómo los aborígenes australianos enviaban señales de humo a mayores distancias todavía. Mientras unos construían una fogata con grandes palos, otros echaban encima arbustos verdes. La altura de la fogata incrementaba la circulación del aire a través del fuego, se avivaba el fuego y los arbustos producían así un humo espeso. Con un esfuerzo coordinado de los trabajadores se puede llegar a hacer ascender una térmica llena de humo. Cuando se hizo esto con la inversión de temperaturas de la montaña o del atardecer, la térmica ascendía hasta que su temperatura era igual que el aire del ambiente, en cuyo punto el humo se difundía horizontalmente para dibujar una forma parecida a un champiñón gigante. Los trabajadores podían controlar la altura en la cual se realizaría la expansión horizontal, estimando cuidadosamente el grado de calor y de altura de la fogata. Si la ocasión era especialmente significativa, los trabajadores podían dibujar hasta seis champiñones sobre la fogata.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ARMAS DE RADIACION INTENSIVA

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS. Dirigido por Samuel Glasstone y preparado por el United States Department of Defense. Government Printing Office, 1977.

NUCLEAR POWER ISSUES AND CHOICES. Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, 1977.

CUANDO EL MAR NEGRO SE DESECABA

HISTORY OF THE MEDITERRANEAN SALINITY CRISIS. Kenneth J. Hsü, Lucien Montadert, Daniel Bernoulli, Maria Bianca Cita, Robert E. Garrison, Robert B. Kidd y Frederic Mèlierés, Carla Müller y Ramil Wright en *Nature,* vol. 267, n.º 5610, págs. 399-403; 2 de junio de 1977.

INITIAL REPORTS OF THE DEEP SEA DRILLING PROJECT: Vol. 42, B. David A. Ross y Yu. Neprochnov. Government Printing Office, en prensa.

LA RADIACION COSMICA DE FONDO Y EL NUEVO MOVIMIENTO DEL ETER

THE FIRST THREE MINUTES: A MODERN VIEW OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE. Steven Weinberg. Basic Books, Inc., 1977.

DETECTION OF ANISOTROPY IN THE COSMIC BLACKBODY RADIATION. George F. Smoot; Marc V. Gorenstein y Richard A. Muller en *Physical Review Letters,* vol. 39, págs. 898-901; 1977.

RADIOMETER SYSTEM. Marc V. Gorenstein, Richard A. Muller, George F. Smoot y J. Anthony Tyson en *Review of Scientific Instruments,* vol. 49, n.º 4, págs. 440-448; abril, 1978.

EL NUCLEOSOMA

CELL AND MOLECULAR BIOLOGY. An appreciation. Eugene Ronseberg. Holt Rinehart & Winston, Inc., N.Y. 1971.

REFLECTIONS ON BIOCHEMISTRY. A. Kornberg, B.L. Horecker, L. Cornudella y J. Oró. Pergamon Press, 1976.

DIFFERENTIAL NUCLEASE ACTION ON NUCLEI & CHROMATIN FROM DEVELOPING GERM CELLS OF THE ECHINODERM *Holothuria tubulosa.* E. Rocha y L. Cornudella en *Biochem. Biophys. Res. Commun.,* vol. 68, n.º 4, págs. 1073-1081; febrero, 1976.

CAMBIOS EN LA ESPERMATOGENESIS Y DISTRIBUCION DE RIBOSOMAS EN EL EQUINODERMO *Holothuria tubulosa.* Luis Cornudella en *Avances de la Bioquímica,* eds. L. Cornudella, C.F. de Heredia, J. Oró y A. Sols. Salvat Editores, S.A., págs. 39-50, 1977.

EL SISTEMA DE APAREAMIENTO DE LEK DEL GALLO DE LAS ARTEMISAS

THE STRUT DISPLAY OF MALE SAGE GROUSE: A "FIXED" ACTION PATTERN. R. Haven Wiley en *Behaviour,* vol. 47, n.º 1 y 2, págs. 129-152; 1973.

EVOLUTION OF SOCIAL ORGANIZATION AND LIFE-HISTORY PATTERNS AMONG GROUSE. R. Haven Wiley en *Quarterly Review of Biology,* vol. 49, n.º 3, págs. 201-227; septiembre, 1974.

EL PRINCIPIO DE ADYACENCIA EN LA PERCEPCION VISUAL

VECTOR ANALYSIS IN VISUAL PERCEPTION OF ROLLING MOTION: A QUANTITATIVE APPROACH. Gunnar Johansson en *Psychologische Forschung,* vol. 36, n.º 4, págs. 311-319; 1974.

LOCAL AUTONOMY IN VISUAL SPACE. Walter C. Gogel y D.H. Mershon en *Scandinavian Journal of Psychology,* vol. 18, págs. 237-250; 1977.

UNIONES INTERCELULARES

CELL COMMUNICATION. Dirigido por R. P. Cox. John Wiley & Sons, Inc., 1974.

STRUCTURE AND FUNCTION OF INTERCELLULAR JUNCTIONS. L. Andrew Staehelin en *International Review of Cytology,* vol. 39, págs. 191-283; 1974.

FUNCTIONAL SIGNIFICANCE OF THE VARIATIONS IN THE GEOMETRICAL ORGANIZATION OF TIGHT JUNCTION NETWORKS. Barbara E. Hull y L. Andrew Staehelin en *The Journal of Cell Biology,* vol. 68, n.º 3, págs. 688-704; marzo, 1976.

GAP JUNCTION STRUCTURES, I: CORRELATED ELECTRON MICROSCOPY AND X-RAY DIFFRACTION. D. L. D. Caspar, D. A. Goodenough, Lee Makowski y W. C. Phillips en *The Journal of Cell Biology,* vol. 74 n.º 2, págs. 607-628; agosto, 1977.

TECNOLOGIA HIDRAULICA ROMANA

POWER. R. J. Forbes en *Studies in Ancient Technology: Vol. 2.* E. J. Brill, Leiden, 1955.

ROMAN DAMS IN TRIPOLITANIA. C. Vita-Finzi en *Antiquity,* vol. 35, págs. 14-20; 1961.

THE AQUEDUCTS OF ANCIENT ROME. Thomas Ashby, editado por I. A. Richmond. Clarendon Press, 1971.

MAN AND WATER: A HISTORY OF HYDRO-TECHNOLOGY. Norman Smith. Charles Scribner's Sons, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

EXPONENTIAL NUMBERS. Eric T. Bell en *The American Mathematical Monthly,* vol. 41, n.º 7, págs. 411-419; agosto-septiembre, 1934.

SOLUTION TO PROBLEM E 461. H. W. Becker en *The American Mathematical Monthly,* vol. 48, n.º 10, págs. 701-703; diciembre, 1941.

THE NUMBER OF PARTITIONS OF A SET. Gian-Carlo Rota en *The American Mathematical Monthly,* vol. 71, n.º 5, págs. 498-504; mayo, 1964.

THE THEORY OF PARTITIONS. George E. Andrews en *Encyclopedia of Mathematics and Its Applications: Vol. 2,* dirigido por Gian-Carlo Rota. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Advanced Book Program, 1976.

TALLER Y LABORATORIO

NATURAL AERODYNAMICS, R. S. Scorer. Pergamon Press, 1958.

GENERAL METEOROLOGY. Horace R. Byers. McGraw-Hill Book Company, 1959.

THE BEHAVIOUR OF CHIMNEY PLUMES. R. S. Scorer en *International Journal of Air Pollution,* vol. 1, n.º 3, págs. 198-220; enero, 1959.

SOME RESTRICTIVE METEOROLOGICAL CONDITIONS TO BE CONSIDERED IN THE DESING OF STACKS. Eugene W. Bierly y E. Wendell Hewson en *Journal of Applied Meteorology,* vol. 1, n.º 3, págs. 383-390; septiembre, 1962.

Taller y laboratorio

¿Qué mecanismo explica la posibilidad de flotación de gotas en su propio medio?

Jearl Walker

El difunto C. L. Stong presentó dos veces en la sección "The Amateur Scientist" de *Scientific American,* experimentos relacionados con el curioso fenómeno de las gotas que resbalan por la superficie del agua durante varios segundos antes de hundirse en el líquido. Quizás el lector ha observado este fenómeno en una máquina automática de café cuando el agua gotea desde el filtro hasta el recipiente de cristal.

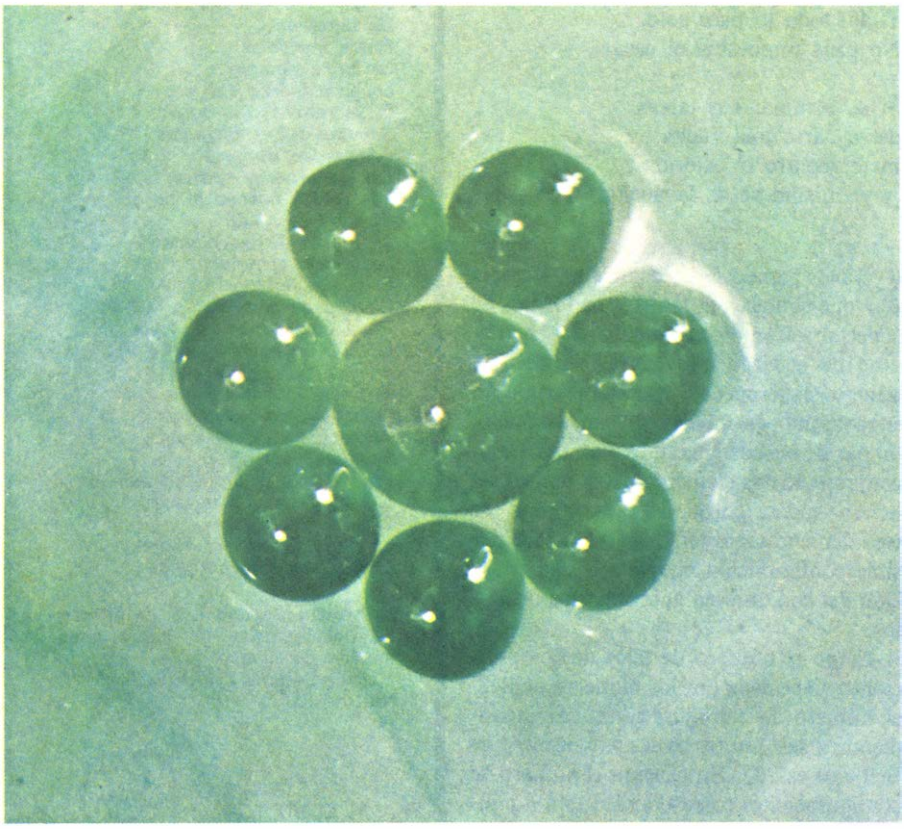
En el primero de los trabajos de Stong (agosto de 1973) Gerard Schol describió un aparato para estudiar las gotas y argumentaba que éstas no se hundían, debido probablemente a la fuerza provocada por la repulsión eléctrica entre la parte inferior de la gota y la masa de líquido situado justo debajo de la misma. En el segundo trabajo (abril de 1974) Kenneth C. D. Hickman experimentaba con algunos casos un poco diferentes: gotas de agua llamadas antiburbujas que flotaban en el agua ligeramente sobrecalentada. Para mí las antiburbujas eran más fáciles de entender que las gotas descritas por Schol, ya que un líquido sobrecalentado tiene una gran tendencia a la evaporación, lo cual provoca la aparición de una capa de vapor por debajo de la antiburbuja, que es lo que la sostiene. Un mecanismo similar mantiene a las gotas de agua encima de un plato caliente en el fenómeno de Leidenfrost, que describimos en esta sección el pasado octubre.

El fenómeno de las gotas de agua que flotan sobre agua a temperatura ambiente ha llamado la atención durante mucho tiempo. John Tyndall examinó dichas gotas en 1885, y ya antes, en 1881, Osborne Reynolds había escrito: "El hecho de que floten gotas por la superficie del agua depende sólo de lo limpia que esté dicha superficie". Aunque Reynolds no especificaba el mecanismo por el que las gotas se sostenían, pensaba probablemente que se debía a la tensión superficial. En su trabajo se indicaba que era muy raro ver gotas flotando por la superficie del agua por causa de las impurezas que dichas superficies suelen acarrear, las cuales, de alguna manera, destruyen los mecanismos de flotación.

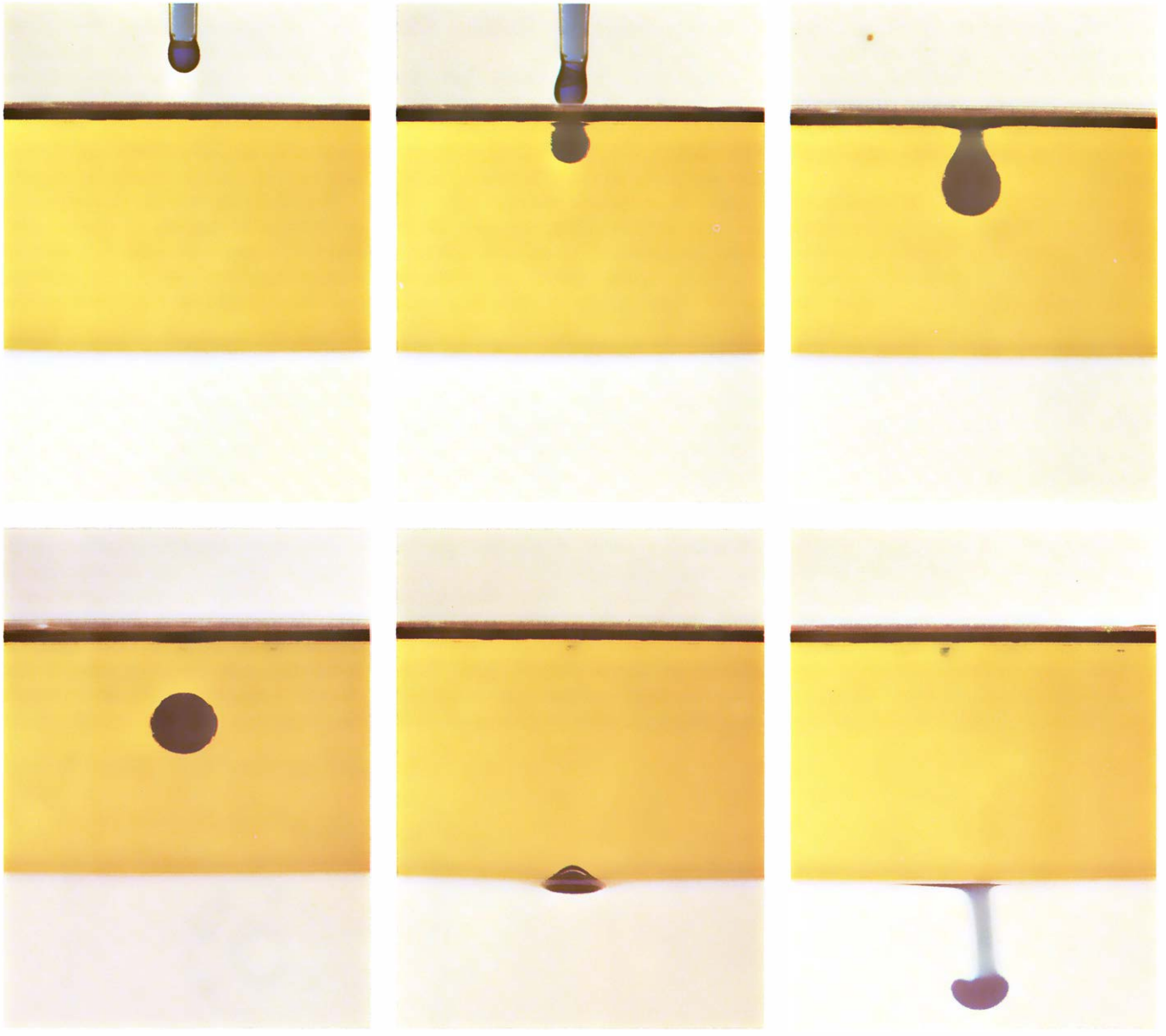
Aunque la naturaleza de las fuerzas que sostienen a las gotas se ha discutido a lo largo de casi un siglo, no creo que ya esté escrita la última palabra, y me apoyo para afirmarlo en un ingenioso experimento que me acaba de remitir James A. Raymond, del Alaska Department of Fish and Game. Raymond afirma que el tiempo de vida de la gota flotante puede alargarse de uno a varios segundos, tal vez diez, añadiendo detergente al agua. Eso se sabía perfectamente. Sin embargo, el hecho digno de mérito que Raymond ha descubierto es que las gotas pueden durar varios minutos haciendo vibrar el recipiente de manera que se formen olas estacionarias en la superficie del agua. En efecto, algunas gotas de Raymond se han mantenido hasta unos 18 minutos. Para ello sugiere que se use un aparato doméstico, una maquinilla eléctrica de cortar el cabello por ejemplo, para hacer vibrar la cara exterior del recipiente que contiene la solución de agua con detergente (dos cucharadas pequeñas por cada litro de agua). Para conseguir un mejor resultado, colocó un recipiente de plástico de un litro con la solución encima de una centrífuga algo desequilibrada. Llegó a conseguir gotas de casi dos centímetros de diámetro, haciendo que se unieran varias gotas más pequeñas o bien formándolas él mismo lentamente con una jeringuilla llena de solución.

Otras investigaciones han referido que las gotas no suelen durar si se colocan una a una, pero que si se pone un flujo constante de gotas sobre la superficie del líquido, las últimas comienzan a flotar. La explicación espontánea de por qué sobreviven las últimas gotas es que las anteriores, al recorrer la superficie del líquido, limpian las impurezas que contiene, y que de alguna manera son las responsables de la destrucción de los mecanismos de soporte. Raymond indica que parte del éxito que se consigue con el flujo de gotas puede deberse a que las primeras gotas hagan vibrar ligeramente la superficie de la masa del líquido, lo que permite que las gotas que vienen detrás floten durante un tiempo.

Raymond halló otros dos detalles de interés. Sus gotas, aunque repelidas por las burbujas de aire de la superficie del líquido, se atraían entre sí. Según parece, la



Motivo floral construido con gotas de agua teñida



Movimientos de una gota de vinagre vertido sobre una capa de aceite de semillas, suprayacente a otra capa de vinagre

repulsión y la atracción tienen que ver con la forma de la superficie del agua cerca de las burbujas de aire y de las gotas. En las burbujas, la superficie está curvada hacia arriba y la gota no subirá por ella, mientras que en las gotas la superficie está curvada hacia abajo, formando un hoyito a su alrededor, lo que hace que dos gotas adyacentes puedan fácilmente dirigirse una hacia la otra. Cuando se encuentren, pueden permanecer unidas como dos gotas, coalescer de repente para formar una sola gota o bien mezclarse con el líquido.

Repitiendo el experimento de Raymond, sustituí el vibrador doméstico por un altavoz de 152 milímetros y un audio-oscilador (ambos pueden comprarse en una tienda de equipos electrónicos). El altavoz no tenía cubierta frontal y lo coloqué boca arriba sobre la mesa. Encima de él puse un recipiente de laboratorio de los llamados "cristal de reloj", por ser muy planos; era lo suficientemente grande como para cubrir el altavoz. También hubiera podido utilizar el cristal o plástico curvado de un reloj de pared; en cualquier caso, puede comprarse un cristal de reloj de laboratorio en una tienda del ramo. La ventaja de mi montaje estribaba en que así podía controlar la amplitud y la frecuencia de la vibración. Concretamente, podía sintonizar o no fácilmente la vibración con la frecuencia de resonancia del conjunto altavoz-aire-cristal-líquido y observar también cómo el tiempo de permanencia de las gotas dependía de la amplitud de la vibración.

Mezclé unos 12 mililitros de detergente líquido con 100 mililitros de agua del grifo, vertí un poco la mezcla en el cristal del reloj y llené una jeringuilla con la solución (también puede usarse un cuentagotas). Cuando hice gotear la solución en el líquido, los resultados me parecieron tan maravillosos como debió haberlos encontrado Raymond. Al sintonizar el audio-oscilador de manera que creara olas estacionarias por resonancia (aunque fueran muy suaves) en la superficie del líquido, las gotas subsistían durante varios minutos. Con mi montaje, obtuve estos resultados para unas frecuencias de oscilación entre 10 y 150 hertz (con mi aparato no podía bajar de 10 hertz).

Cuando sintonizaba el oscilador fuera de la frecuencia de resonancia, al objeto de que las olas estacionarias desaparecieran (esto se puede hacer sintonizando una frecuencia demasiado alta o bien disminuyendo la amplitud de la oscilación), las gotas se hundían en el líquido a los pocos segundos. Solamente en presencia de la vibración, las gotas podrían flotar por un pe-

ríodo superior a los 10 segundos. Antes de recibir la carta de Raymond, me había acostumbrado ya a que las gotas durasen sólo el escaso tiempo necesario para examinarlas precipitadamente; ahora, las gotas duran tanto que me permito ir a tomar un café y, cuando vuelvo, siguen todavía allí.

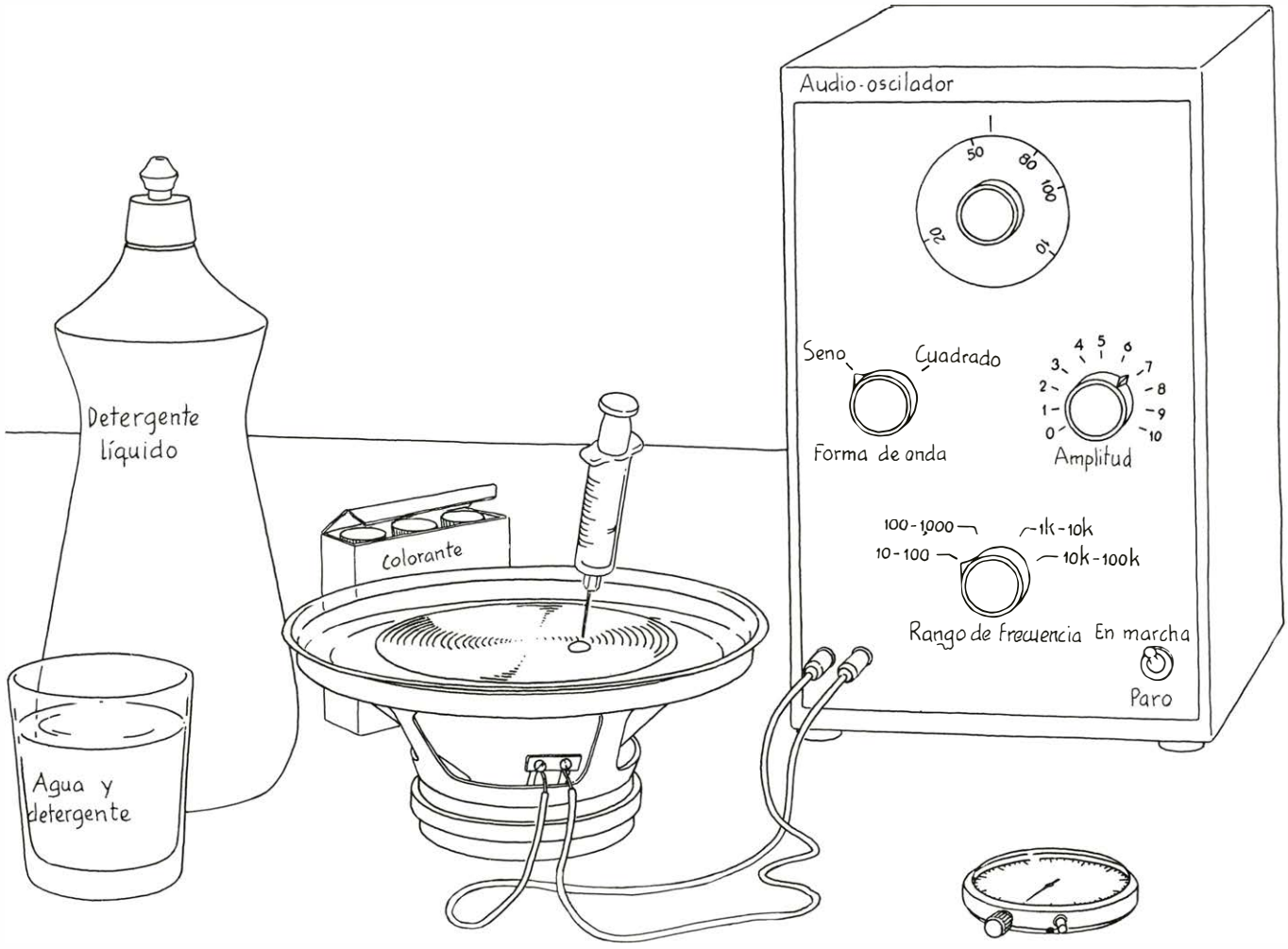
La mayoría de las gotas que flotaban tenían de uno a varios milímetros de diámetro, más o menos el tamaño de la longitud de onda de las olas de la superficie del agua cuando el oscilador estaba en 50 hertz. Haciendo que varias gotas pequeñas se unan o bien depositando con la jeringa una gran cantidad de líquido, he formado grandes gotas que producen unas depresiones significativas en la superficie del agua, y cuyo diámetro es mayor que la longitud de onda de las olas de la superficie. Si las gotitas, al unirse, no coalescen formando una sola gota, permanecerán unidas aunque diferenciadas formando una especie de balsa de gotitas flotante. Conseguí balsas de más de dos o tres centímetros de largo, cada una de ellas formada por una docena aproximada de gotitas. Con mucho cuidado conseguí hacer un bonito montaje que consistía en una gran gota central rodeada por un anillo de gotas pequeñas. Cuando más tarde comencé a usar colorante en las gotas pude hacer balsas rojas y azules y construir una especie de flor.

Como otros investigadores han referido, las gotas no siempre se portan bien. Nadie ha comprendido totalmente su voluble conducta. Hay veces en que es imposible que se formen, debido quizás a variaciones en el campo eléctrico local. Por ejemplo, un investigador que pase por delante del aparato puede provocar alteraciones en el campo eléctrico que rodea las gotas y dar lugar a que éstas se mezclen con el líquido. Las impurezas superficiales también son importantes, ya que las partículas de polvo sobre la superficie del líquido impiden que las gotas floten. Yo mismo lo comprobé vertiendo una ligera capa de polvo de licopodio (polvo orgánico hidrofóbico que se puede encontrar en cualquier establecimiento de venta de productos químicos) sobre la superficie e inmediatamente perdí mi habilidad para hacer gotitas flotadoras.

La fabricación de gotitas flotantes depende también, según parece, de la altura a la que se encuentre la jeringa sobre la superficie del agua al echar las gotas. Si dejaba, con sumo cuidado, que se formara una gota en el extremo de la aguja de la jeringa y que cayera a su aire, la gotita flotaba o no según que la altura desde la cual caía estuviera o no dentro de un determinado rango. Cuando se vertía el líquido desde más arriba, sólo podían conseguirse gotitas flotantes si al caer éstas desde la jeringa lo hacían con suficiente fuerza como para salpicar gotas de líquido que flotaran.

Se diría que la mayoría de las gotas, especialmente las grandes, se quedan inmóviles en los nodos (los sitios de mínima vibración superficial) de las olas estacionarias. Sin embargo, es muy difícil verificar esta aserción, ya que las gotas grandes provocan tal hundimiento en la superficie del líquido que destruyen cualquier formación típica de olas estacionarias en sus alrededores. Algunas de las gotas pequeñas subían y bajaban continuamente de acuerdo con el movimiento oscilatorio, con la misma forma de frenética oscilación que habíamos visto en el efecto Leidenfrost.

Una explicación del mecanismo que las mantiene a flote es que las moléculas de agua en la superficie se orientan a sí mismas, de manera que la superficie resulta eléctricamente negativa. Por tanto, el fondo de la gota, siendo negativo, es repelido por la superficie de la masa del líquido que es también negativo. La única prueba



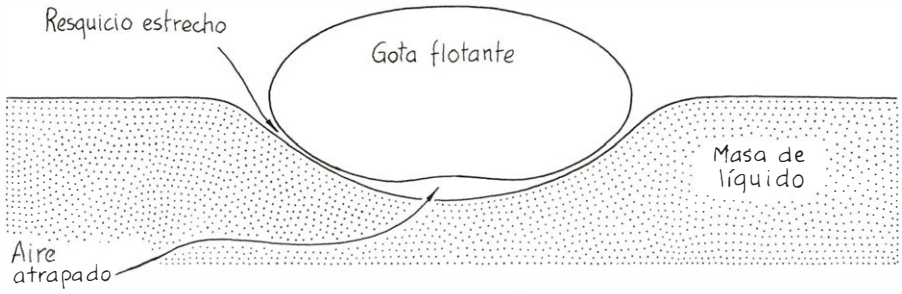
Equipo para hacer vibrar una superficie portadora de una gota

de que existe este mecanismo de repulsión, que yo haya visto, es que la presencia de un campo eléctrico externo en las proximidades de las gotas las destruye. Lo mismo sucedería aunque el mecanismo de soporte no tuviera naturaleza eléctrica, ya que las fuerzas del campo eléctrico externo podrían también anularlo.

Acerquemos una varilla cargada negativamente sobre una gota flotante. Con independencia de que la gota esté ligeramente cargada o sea neutra, el campo eléctrico de la varilla polariza la gota, de manera que su parte superior (la más próxima a la varilla) es positiva y su parte inferior (la más alejada de la varilla) es negativa. Justo por debajo de la gota, la superficie de la masa del líquido se hace positiva. Como esta superficie y la de la parte inferior de la gota –cargada con signo positivo– están muy próximas, la gota es impulsada a introducirse en el líquido. Así un campo eléctrico exterior puede hacer que la gota se funda con la masa del líquido, aun cuando la gota no hubiera estado mantenida por fuerzas de carácter eléctrico. Los campos eléctricos se usan para coalescer gotas flotantes de modo similar con el fin de obviar las nieblas indeseables.

Otra explicación (la más ampliamente aceptada) asegura que el mecanismo de soporte es una fina capa de aire que queda atrapado debajo de cada gota en el instante en que llega a la superficie del líquido. El aire forma una capa de 100 × 1000 nanómetros de espesor, y puede estar a una presión suficientemente alta como para hundir la parte inferior de la gota, de la misma manera que se hunde la superficie de la masa de líquido. El tiempo de permanencia de la gota viene determinado por la velocidad a la cual el aire se pierde o se sale a través del estrecho resquicio que rodea la parte de superficie deprimida. Una vez que la capa de aire se hace muy estrecha (menos de 50 nanómetros), ya no resiste el peso de la gota y éste termina por romper dicha capa. Entonces, la gota se mezcla con toda la masa del líquido o bien se divide en gotitas que continúan flotando.

La velocidad con que se pierde la capa de aire depende de tres factores: posible desequilibrio de las tensiones superficiales en la superficie de la masa del líquido, viscosidad de la masa de líquido y de la gota y viscosidad del aire atrapado debajo de la misma. A medida que el aire se va escapando, éste intenta arrastrar consigo la capa superior de la masa de líquido. Si el líquido tiene una viscosidad alta, la corriente –tanto de líquido como de aire– se frena, y la gota resiste un tiempo relativamente largo. La incorporación de detergente en el agua incrementa el tiempo de flotación por la razón anterior. Aunque el detergente rebaja la tensión superficial del agua incrementa la viscosidad de la superficie. Si se sustituye el aire por otro gas más viscoso, como el dióxido de carbono, o se utiliza un líquido más viscoso, la velocidad a la cual el aire se pierde también se hace menor y, por tanto, aumenta la duración de la gota.



Mecanismo de aire atrapado para hacer flotar una gota

El hecho de que la tensión superficial en la zona de la masa de líquido de que estamos tratando sea uniforme es un factor importante. Supongamos que la tensión superficial justo debajo de una gota fuera menor debido al vapor emitido por la misma. Entonces, la mayor tensión superficial de la región exterior a la zona contaminada echaría la masa de líquido en dirección radial hacia fuera, arrastrando el aire atrapado con dicha masa y, por tanto, disminuyendo el tiempo de vida de la gota. Ese tipo de movimiento a lo largo de la superficie del líquido, provocado por la no uniformidad de las tensiones superficiales, se denomina "efecto Marangoni" (en honor de Carlo G. M. Marangoni, quien lo estudió en la última mitad del siglo XIX). Con una gota de agua su tiempo de vida varía de 3 a 10 segundos, dependiendo sobre todo de la viscosidad del aire y de la viscosidad de la solución del agua con el detergente.

La idea del aire atrapado debajo de la gota ayuda a explicar por qué mis gotas flotaban si se las dejaba caer desde una altura dentro de un determinado rango. Si, por casualidad, dejaba caer una gota justo desde la misma superficie, es decir, a una altura prácticamente cero, la gota llegaba a la superficie del líquido con una velocidad relativamente baja y, por lo visto, no atrapaba aire. Una mayor altura le daba una mayor velocidad, que le permitía atrapar suficiente cantidad de aire como para soportar a la gota. Si la altura de caída era demasiado elevada, las salpicaduras (es decir, la corona que rodea el punto de impacto o el chorro central vertical que sigue a la corona en expansión) podían producir gotas flotantes.

Este modelo también explica la ausencia de gotas flotantes en agua sucia o con polvo. Cualquier partícula de polvo o cualquier pelo presente en la superficie del líquido podrían pinchar la capa de aire y provocar que la gota se hundiera confundiéndose con toda la masa de líquido.

Si se acepta este modelo como mecanismo de soporte en la flotación de las gotas, dicho modelo debe explicar también el porqué si se hace vibrar la masa del líquido aumenta la vida de las gotitas. Raymond sugirió que de alguna forma esta vibración podría bombear aire bajo las gotas, de manera que continuara sustentándolas. Me atraía tal idea, pues estaba de acuerdo con la hipótesis generalmente aceptada de que el aire atrapado es el que actúa como mecanismo de soporte. Dicho bombeo podría venir verosimilmente de la manera de moverse la superficie de la masa del líquido, que arrastraría aire para colocarlo debajo de las gotas. Imaginemos una pequeña gota situada en el nodo de un conjunto de olas estacionarias. Como las zonas de fluido, a la derecha y a la izquierda, oscilan en desfase entre sí, podría haber un intercambio periódico de líquido entre la derecha y la izquierda por debajo de la gota, arrastrando aire durante el proceso. Incluso fuera de la superficie de circulación, las oscilaciones combinadas de la superficie y la gota pueden atrapar periódicamente más aire, para llevarlo debajo de la gota.

Aunque el aire puede bombearse así debajo de las gotas, el modelo presenta algunos problemas. Primero, no acabo de ver cómo las oscilaciones combinadas de la superficie y la gota pueden poner más aire bajo la gota mientras que el peso de la misma está tratando de expulsar el aire fuera de esa zona. Segundo, las balsas de agua que he descrito son difíciles de explicar sin recurrir a la hipótesis de que el aire atrapado debajo de las gotas centrales está tan lejos del perímetro de una balsa que no se escapa con facilidad y, por tanto, no necesita ser reemplazado.

El tercer problema es más difícil. No hubo manera de que detectara circulación de agua cerca de una gota flotante sola. Para localizar la circulación, puse una pequeña cantidad de colorante en la masa del líquido y conseguí que un filamento fino de colorante estuviera cerca de una gota. Trabajé con dos tipos de colorante: uno fucsia (que se puede obtener en tiendas de suministros industriales) y el otro azul común (también puede ser colorante doméstico rojo). Poniéndolos en pequeñas canti-

dades, ninguno de los colorantes parecía alterar el mecanismo de soporte de las gotas por medio de cambios radicales en la tensión superficial o la viscosidad de la masa de líquido. Podía acercar una gota a un filamento de colorante colocando la aguja de mi jeringa cerca de la gota. Debido a que el líquido se curvaba hacia arriba, sobre la aguja, la gota se alejaba. Podía esperarse que cuando una gota alcanzaba el filamento de colorante cualquier circulación por debajo de la gota transportara parte del filamento consigo, pero yo observé este efecto muy raramente. Si existe circulación por debajo de la gota, ésta es sorprendentemente lenta, incluso imperceptible. Hallé, sin embargo, muestras de circulación cuando dos o más gotas estaban flotando una al lado de la otra: aquí las vibraciones de cada gota alteraban las vibraciones de las otras. Esta circulación podría introducir aire debajo de las gotas.

También comprobé si la gota tenía circulación interna que pudiera bombear aire a la parte inferior de ésta. Para ello logré primero una gran gota flotante uniendo varias pequeñas. Añadí después otra gotita teñida. Tras varios intentos conseguí que esta gotita teñida se incorporara a la gota transparente mayor, y esta adición de colorante a la gota grande me permitió averiguar los tipos de circulación interna. Pensaba que la gota podría desarrollar una corriente descendente en su parte exterior y ascendente en el centro, arrastrando así aire por debajo de sí misma. La pista de colorante reveló la inexistencia de tal modelo interno. La realidad fue que el colorante se extendió por la gota con bastante lentitud, y ningún movimiento inmediato del mismo parecía deberse al giro de la gota a consecuencia de la alteración producida por la coalescencia.

¿Por qué ocurre entonces que las gotas colocadas en la superficie de una líquido vibrante duran mucho más? Otros experimentos han determinado que es una repulsión eléctrica el principal mecanismo de soporte, pero yo no veo cómo puede incrementarse esa fuerza por la vibración. Aun cuando los modelos de circulación y bombeo de aire en la parte inferior de una gota me resultan muy atractivos, no puedo observar ninguna circulación de buenas a primeras. Sin embargo, el hecho es que las gotas duran mucho más en una superficie que vibra.

Pude sacar buen partido del examen de las gotas flotantes bajo una luz de strobe colocada a una frecuencia próxima a la frecuencia de oscilación, de manera que el centelleo de la luz redujera eficazmente la vibración de las gotas. Encontré dos tipos de vibraciones entre las gotas: las muy pequeñas llegaron a oscilar tanto (debido a la superficie vibrante) que saltaban por el aire cada vez que la superficie se abombaba. Probablemente, estas gotas volvían a tomar aire al alcanzar la superficie de la masa otra vez; por ello retrasaban su coalescencia con la masa de líquido hasta que algún contratiempo casual las destruía.

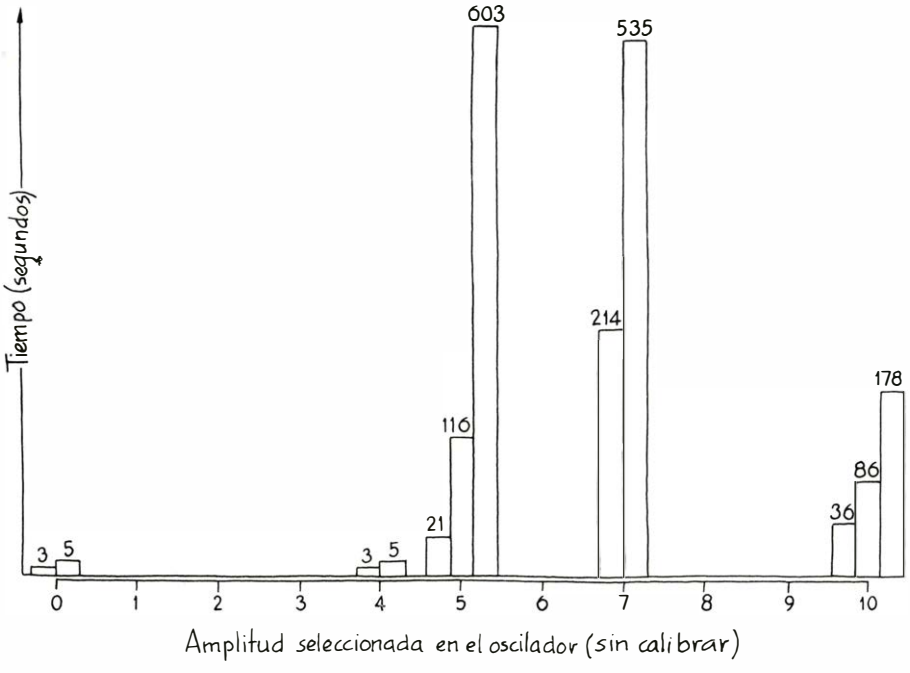
Por otro lado, una gota mayor no abandonaba la superficie y su centro de masa no parecía moverse mucho verticalmente. La gota oscilaba variando periódicamente desde una forma relativamente alta y delgada a otra relativamente baja y gruesa. Vista esta variación de tamaño desde arriba, ésta era simétrica alrededor de la gota. Rodeando la gota había círculos concéntricos de ondas de superficie generadas verosímilmente por las vibraciones de las gotas.

Yo creo que siempre que el líquido base situado directamente debajo de la gota empujaba hacia arriba la capa de aire, la parte inferior de la gota era también impulsada hacia arriba, obligándola a extenderse. Dado que la gota se sometía a oscilación hasta la resonancia o cerca de ésta, por el líquido base se producía un desfase de entre 0 y 90 grados entre los dos movimientos. En otras palabras, la gota podría llevar un retraso con relación al líquido base de un cuarto del período de oscilación. La expansión radial de la gota empujaba a su vez (por medio de la capa de aire) el borde del hoyuelo, produciendo un pico en las ondas de la superficie. Siempre que el líquido base descendía por debajo de la gota, ésta se hacía más fina y se expandía verticalmente a medida que el borde del hoyuelo se movía radialmente hacia dentro.

Este movimiento a lo largo del borde mengua, en general, la pequeña rendija a través de la cual el aire debe escaparse en algún momento, si la gota acaba por coalescer con el líquido base. La velocidad a que escapa depende del cubo del ancho de la rendija; ello significa que, si ésta se estrecha, el tiempo que tardará en escapar puede ser notablemente más largo. Supongamos que la rendija se estrecha desde 200 nanómetros, en una situación de calma, a 50 nanómetros, en situación de vibración, lo que significa una reducción de la cuarta parte. El tiempo de escape y, por tanto, el de vida de la gota se incrementaría en 4^3, o 64, veces. Si el tiempo medio de duración es de 10 segundos en una superficie en calma, subiría a casi 11 minutos en la superficie vibrante. Por ello, una gota dura evidentemente más, ya que la vibración hace más estrecha la ruta de escape del aire que soporta la gota.

Cuando coloqué dos gotas una junto a la otra, cada una perturbaba las oscilaciones de la otra y distorsionaba la componente de expansión radial en sus vibraciones. Desde arriba pude ver cómo cambiaba cada gota desde una forma oblonga y perpendicular a una línea que pasaría por los centros de las gotas hasta ser algo oblonga y paralela a la línea. Las gotas estaban siempre en fase en estos cambios. Usando un colorante descubrí que el líquido base era impulsado hacia arriba bajo las gotas desde ambos lados, a lo largo de la línea que atravesaba sus centros; después era expulsada hacia fuera entre las gotas perpendiculares a esa línea.

Algunos de mis resultados obtenidos respecto a la duración de las gotas a 50 hertz están representados en la ilustración de la izquierda en función de los valores de amplitud –no calibrada– del audio-oscilador. Las gotas tenían todas el mismo ta-



Tiempos de flotación de gotas de agua en una superficie de agua con detergente

maño aproximadamente (unos milímetros de diámetro) y les permití caer desde la misma altura, pero no las dejé que se fusionaran con otras gotas (tenía la impresión de que la coalescencia alargaba la duración de las gotas, pero no llegué a comprobarlo). No tengo razones para dar por supuesto que la relación entre su separación y la amplitud de las vibraciones en el agua de mi cristal de reloj sea lineal; es probablemente bastante complicado. Sin embargo, se pueden ver dos interesantes características en estos datos. Con poca o ninguna amplitud de oscilación, las gotas duraban muy poco tiempo. En el rango intermedio era donde más duraban. Con amplitudes mayores la duración decrecía, probablemente porque las oscilaciones en el líquido base eran tan violentas que las gotas al moverse perdían su soporte de aire. La segunda característica interesante es que aun cuando algunas gotas duraban mucho tiempo (el récord fue de unos 10 minutos), otras con el mismo valor de amplitud y bajo circunstancias aparentemente iguales duraban poco.

Traté de aislar una gota flotante de varias formas: poniendo balsas de burbujas de aire, haciendo descender un anillo a su alrededor o colocando un lazo de alambre en el líquido base y tirando luego del alambre hacia arriba para colocar una burbuja de jabón sobre la gota flotante. Siempre que el agua que rodeaba a la gota continuara vibrando, aunque fuera suavemente, ésta podía durar largo tiempo.

El lector quizá se pregunte por qué las gotas que se tocan no se funden siempre inmediatamente. Pienso que una capa de aire atrapado debe permanecer entre ellas de la misma forma que otra está debajo. Cuando dos gotas se juntan, una cae dentro del hoyuelo de la otra y, por ello, adquieren una mayor velocidad horizontal. Si esa velocidad es suficiente, puede ocurrir que entre las gotas quede aire atrapado y éste necesita cierto tiempo para fugarse. A veces, la capa de aire es lo suficientemente fina como para que las gotas se fundan y formen una sola. También puede ocurrir que la vibración haga que se rompan las capas de soporte y las gotas se fundan con el líquido base. El mecanismo de fusión de las gotas es importante para el estudio de las nieblas y brumas, donde las gotitas suspendidas en el aire entran en contacto y posiblemente se funden para formar gotas mayores.

El fluido que soporta una gota no tiene por qué ser aire ni gas. Lo que se necesita es una gota que caiga a través de otro fluido, en el que no se mezcle, y que encuentre un líquido base de su mismo tipo. Por ejemplo: yo vertí una capa de vinagre en un recipiente y después añadí otra capa de aceite de semillas. Cada capa tenía un espesor de dos centímetros, por lo menos. Con la jeringa inyecté pequeñas cantidades de vinagre en una pequeña zona de la superficie del aceite, creando una gota que colgaba de la capa de aceite. Llegó un momento en que la gota adquirió suficiente peso y se desprendió de la capa de aceite para caer en la de vinagre. Al principio, la caída hizo que la gota fuera descendiendo con rapidez, pero a medida que se aproximaba a la capa de vinagre fue reduciendo su velocidad porque el aceite entre ésta y el aceitevinagre de la interfase tenía que ser presionado y retirado del camino. Cuando la gota alcanzó la interfase, quedaba aún algo de aceite atrapado debajo de la gota, la cual se asentó en la interfase con el mismo hoyuelo característico de las gotas de agua. Al minuto, más o menos, la gota entró en la capa de vinagre, según parecía porque la de aceite bajo la misma había llegado a ser suficientemente fina. Teñí las gotas de vinagre para ver más claramente este proceso y el consecuente movimiento del vinagre hacia su propia capa. Me resultó muy bonita la contemplación de una gota azul o roja en medio de la capa amarilla de aceite que esperaba a que la capa de éste fuera lo suficientemente fina para poder escapar.

¿Se puede prolongar, por medio de la vibración, la vida de las gotas de vinagre situadas en la interfase de los líquidos? La respuesta es afirmativa. Cuando coloqué el recipiente en mi cristal de reloj e hice vibrar entrando en resonancia el conjunto como anteriormente, la duración de la gota aumentó desde alrededor de un minuto hasta 2,5 o 3 minutos.

Cuando una burbuja de aire asciende a través de un fluido y choca contra un objeto plano, como el fondo de un recipiente sumergido en el fluido, éste necesita algún tiempo para apartarse del camino (como ocurría con el aceite y las gotas de vinagre). La burbuja alcanza primero el obstáculo plano, permaneciendo una fina lámina entre el aire y la barrera. A una velocidad que depende de la viscosidad del fluido, la lámina fluye fuera del camino de la burbuja haciéndose tan fina que al final ésta se rompe y el aire toca el obstáculo directamente.

Se pueden hacer muchos más experimentos con gotas flotantes; utilizando agua como líquido base se puede tratar de conseguir gotas flotantes de fluidos distintos del agua. Yo conseguí hacer flotar gotas de alcohol sobre una lámina de alcohol. Se podría intentar con aceites tanto en experimentos de gota flotante como de burbuja ascendente. ¿Se produce el alargamiento de la vida de las gotas por vibración en agua más profunda? No lo sé; podría averiguarse. Para obtener una duración larga de la gota, ¿son necesarias ondas vibratorias de aproximadamente su tamaño? ¿Permanecerán las gotas flotando durante varios minutos si la frecuencia de la vibración está claramente por encima de 150 hertz o si es menor de 10?

El lector podría estar interesado en realizar experimentos con gases distintos del aire o con líquidos de soporte diferentes del aceite de semillas. ¿Es siempre favorable la vibración? En el experimento de las gotas de agua se puede intentar obtener una correspondencia entre la concentración del detergente y la duración de las gotas. En particular, podría encontrarse un estancamiento en la duración de éstas a partir de cierta concentración, lo cual implicaría un estancamiento en el cambio de la viscosidad superficial debida al detergente. Suponiendo que la vibración fuera completamente estacionaria en un experimento con una gota de agua, ¿flotarían las gotas durante horas o es su límite más alto 18 minutos? Si la duración resulta ilimitada, mi explicación de cómo alargan el tiempo las vibraciones es errónea.

Al jugar con el agua es posible que veamos fenómenos originados por la tensión superficial, y puede llevarnos a pensar en un viejo juego de salón. Para hacerlo hay que llenar un vaso de agua limpia, espolvorear pimienta en la superficie y acercar al agua, por un lado, un trozo de jabón; las partículas de pimienta se amontonarán en el lado opuesto.

Este movimiento a través de la superficie es otjabón depositada en la superficie rebaja inmediatamente la tensiada en la superficie rebaja inmediatamente la tensión superficial, y la zona libre de jabón se contrae debido a su mayor tensión superficial. Las partículas de pimienta son atrapadas por la contracción y sufren, consecuentemente, un desplazamiento.

En otro juego de salón se colocan pequeñas partículas de alcanfor (que se puede adquirir en casas dedicadas al suministro de productos químicos) en la superficie de agua limpia. Debido a la velocidad variable a la que el alcanfor se disuelve alrededor de su perímetro, las partículas danzan de un lado para otro. Para explicarlo, supongamos que una esquina cualquiera de una partícula se disuelve antes, con lo cual la tensión superficial en ese punto desciende y la partícula es atraída por la tensión superficial mayor existente en el otro lado. Después, se disuelve otra esquina y, de nuevo, es atraída la partícula hacia el lado opuesto, hasta que se ha disuelto una cantidad de alcanfor suficiente para hacer que la tensión de la superficie circundante sea ya inferior al valor necesario para atraer a las restantes moléculas fuera de la partícula. Hace años los niños jugaban con barquitos impulsados por alcanfor y alcohol depositados en la popa. Las dos sustancias rebajaban la tensión superficial local, haciendo que al ser mayor ésta a proa impulsara el barco hacia delante.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL PRIMER ANTECEDENTE DE LA ESCRITURA

AN OPERATIONAL DEVICE IN MESOPOTAMIAN BUREAUCRACY. A. Leo Oppenheim en *Journal of Near Eastern Studies,* vol. 17 págs. 121-128; 1958.

GLYPTIQUE SUSIENNE. Pierre Amiet en *Mémoires de la Délégation archéologique en Iran,* vol. 43; 1972.

AN ARCHAIC RECORDING SYSTEM AND THE ORIGIN OF WRITING. Denise Schmandt-Besserat en *Syro-Mesopotamian Studies,* vol. 1, n.º 2; julio, 1977.

NUCLEOS LIGEROS EXOTICOS

NUCLEAR SPECTROSCOPY FROM DELAYED PARTICLE EMISSION. John C. Hardy en *Nuclear Spectroscopy and Reactions: Part C,* dirigido por Joseph Cerny. Academic Press, Inc., 1974.

ON-LINE MASS SEPARATION. R. Klapische en *Nuclear Spectroscopy and Reactions: Part A,* dirigido por Joseph Cerny. Academic Press, Inc., 1974.

DELAYED PROTON RADIOACTIVITIES. Joseph Cerny y John C. Hardy en *Annual Review of Nuclear Science: vol. 27,* dirigido por Emilio Segre. Annual Reviews, Inc., 1977.

ESTANCAMIENTO DE LAS AGUAS DEL MAR MEDITERRANEO

NILE CONE DEPOSITIONAL PROCESSES AND PATTERNS IN THE LATE QUATERNARY. A. Maldonado y D.J. Stanley, en *Canyons, Fans and Trenches,* dirigido por D.J. Stanley y G. Kelling, Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., págs. 239-257, 1978.

THE MEDITERRANEAN SEA - A NATURAL SEDIMENTATION LABORATORY. Dirigido por D.J. Stanley. Dowden, Hutchinson and Ross, Stroudsburg, Pa., pág. 765. 1972.

STABLE ISOTOPIC FRACTIONATION, CLIMATE CHANGE AND EPISODIC STAGNATION IN THE EASTERN MEDITERRANEAN DURING THE LATE QUATERNARY. C. Vergnaud-Grazzini; W.B.F. Ryan, y M.B. Cita en *Marine Micropaleontology,* vol. 2, págs.353-370; 1977.

MASERES COSMICOS

INTERSTELLAR MASERS. Dale F. Dickinson, Marvin M. Litvak y Benjamin M. Zuckerman en *Sky and Telescope,* vol. 39, n.º 1, págs. 4-7; enero, 1970.

MICROWAVE CELESTIAL WATER- VAPOR SOURCES. K. J. Johnston, S. H. Knowles y P. R. Schwartz en *Sky and Telescope,* vol. 44, n.º 2; agosto, 1972.

COHERENT MOLECULAR RADIATION Marvin M. Litvak en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics: vol. 12,* dirigido por Geoffrey R. Burbridge. Annual Reviews Inc., 1974.

CONTEMPORARY ASTRONOMY. Jay M. Pasachoff. W. B. Saunders Company, 1977.

EL MODELADO DE LOS TEJIDOS EN LOS EMBRIONES

ANALYSIS OF MORPHOGENETIC MOVEMENTS IN THE NEURAL PLATE OF THE NEWT *TARICHA TOROSA.* Mary Beth Burnside y Antone G. Jacobson en *Developmental Biology,* vol. 18, n.º 6, págs. 537-552; diciembre, 1968.

MESODERM MOVEMENTS IN THE AMPHIBIAN NEURULA. Carl-Olof Jacobson y Jan Löfberg en *Zool. Bidrag (Uppsala),* vol. 38, págs. 233-239; 1969.

CHANGES IN THE SHAPE OF THE DEVELOPING VERTEBRATE NERVOUS SYSTEM ANALIZED EXPERIMENTALLY, MATHEMATICALLY AND BY COMPUTER SIMULATION. Antone G. Jacobson y Richard Gordon en *The Journal of Experimental Zoology,* vol. 197, n.º 2, págs. 191-246; agosto, 1976.

TEORIA DE COMPLEJIDAD

MEMORY REQUIREMENTS IN A TELEPHONE EXCHANGE. Claude E. Shannon en *Bell System Technical Journal,* vol. 29, n.º 3, págs. 343-349; julio, 1950.

A STUDY OF NON-BLOCKING SWITCHING NETWORKS. Charles Clos en *Bell System Technical Journal,* vol.32, n.º 2, págs. 406-424; marzo, 1953.

ON CROSSBAR SWITCHING NETWORKS. Nicholas Pippenger en *IEEE Transactions on Communications,* vol. 23, n.º 6, págs. 646-659; junio, 1975.

LA PROTECCION DE LA PIEDRA

L'AFFERMISSEMENT STRUCTURAL DES PIERRES AVEC DES SOLUTIONS A BASE DE RESINES EPOXYDES. W. Domaslowki en *1970 New York Conference on Conservation of Stone and Wooden Objects,* págs. 85-93. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1971.

THE WHEATHERING OF NATURAL BUILDING STONES. R. J. Schaffer. Building Research Establishment, Special Report n.º 18, 1972.

PERFORMANCE CRITERIA FOR STONE TREATMENT. K. Lal Gauri, J. A. Gwinn y R. K. Popli en *2nd International Symposium on the Deterioration of Building Stones,* págs. 143-152. National Technical University of Athens. 1976.

EL COMPORTAMIENTO ALIMENTARIO DE LOS MOSQUITOS

AËDES AEGYPTI: THE YELLOW-FEVER MOSQUITO. S. R. Christophers. Cambridge University Press, 1960.

BLOOD-FEEDING BEHAVIOR OF ADULT *AËDES AEGYPTI* MOSQUITOES. Jack Colvard Jones y Dana Pilitt en *The Biological Bulletin,* vol. 145, n.º 1, págs. 127-139; agosto, 1973.

HOST-FEEDING PATTERNS OF MOSQUITOES, WITH A REVIEW OF ADVANCES IN ANALYSIS OF BLOOD MEALS BY SEROLOGY. C. H. Tempelis en *Journal of Medical Entomology,* vol. 11, n.º 6, págs. 635-653; 10 de enero de 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

THE AMBIDEXTROUS UNIVERSE. Martin Gardner. Basic Books, Inc., 1964.

EL LIBRO DE LOS SERES IMAGINARIOS. Jorge Luis Borges., Kier. Buenos Aires, 1967.

ANIMAL ASSYMETRY. A. C. Neville. Edward Arnold, London, 1976.

A RECURSIVE APROACH TO THE CONSTRUCTION OF THE DELTAHEDRA. William McGowan en *Mathematics Teacher,* vol. 71, n.º 3, págs., 204-210; marzo, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

THE GRAVITY APROACH AND COALESCENCE OF FLUID DROPS AT LIQUID INTERFACES. G. D. M. MacKay and S. G. Mason en *Canadian Journal of Chemical Engineering,* vol. 41 págs. 203-212; octubre, 1963.

PHYSICAL SURFACES. J. J. Bikerman. Physical Chemistry Series: vol. 20. Academic Press, Inc., 1970.

Taller y laboratorio

Sistemas químicos que permiten oscilar de un color dado a otro

Jearl Walker

Si se mezclan perfectamente diversas sustancias químicas, lo lógico es esperar que la mezcla adopte un color único y uniforme. Sin embargo, algunas reacciones químicas producen una sorprendente oscilación de colores. Unas veces cada minuto y otras veces de hora en hora, las soluciones cambian de color pasando de uno a otro cíclicamente.

Uno de los más famosos osciladores de este tipo fue descubierto en 1958 por el químico ruso B.P. Belousov, e investigado posteriormente por A.M. Zhabotinsky y otros. La reacción original tenía lugar al mezclar bromato potásico, sulfato cérico y ácido cítrico en ácido sulfúrico diluido. La oscilación iba del incoloro al amarillo. Desde entonces se han encontrado otras mezclas que oscilan del rojo al azul, del violeta al azul, del rojo al verde e incluso del incoloro al dorado y, posteriormente, al azul. En este trabajo se describirá cómo hacer varios osciladores de éstos y cómo investigar las causas o motivos que provocan la periodicidad de los cambios.

En este trabajo el lector podrá entretenerse con cuestiones que aún no han sido totalmente resueltas. Cabría esperar oscilaciones cromáticas en mezclas no homogéneas, ya que en ellas el motivo puede ser la posterior difusión de un ingrediente en otro. Pero las oscilaciones de un sistema cerrado consistente en una mezcla homogénea siempre se habían visto como una cosa imposible, sobre la base de que lo contrario violaría una ley fundamental de física y química, según la cual toda reacción espontánea debe hacer descender regularmente la energía libre de Gibbs del sistema (más adelante hablaremos de la energía libre de Gibbs).

En 1970 Zhabotinsky y A.N. Zaikin comunicaron que habían encontrado estructuras periódicas (ondas circulares) que recorrían de una parte a la otra una solución, cuya composición era un tanto distinta de la solución primitiva que sirvió como punto de partida. Más tarde, Arthur T. Winfree, que está ahora en la Purdue University, mejoró la fórmula con la que obtener la solución y examinó ampliamente las estructuras periódicas de las ondas espirales rotativas que aparecían en dicha solución. Winfree redactó para mí unas normas de trabajo con las que poder realizar las reacciones uno mismo, que a continuación paso a describir.

Winfree sugiere la siguiente forma de mezclar los reactivos para obtener un oscilador del rojo al azul. Añadir dos mililitros de ácido sulfúrico concentrado y cinco gramos de bromato sódico a 67 mililitros de agua pura (destilada o desionizada) con lo que se obtendrán 70 mililitros de solución. *Como norma de seguridad añadir siempre lentamente el ácido al agua y nunca el agua al ácido, ya que existe el peligro de que explote.*

Verter seis mililitros de esta solución en un recipiente de vidrio y añadirle 0,5 mililitros de una solución de bromuro sódico, obtenida agregando un gramo de bromuro sódico a 10 mililitros de agua. A continuación añadir un mililitro de solución de ácido malónico (malonato) hecha poniendo 1 gramo de ácido malónico en 10 mililitros de agua. Una vez que haya desaparecido el color del bromo poner a la solución un mililitro de solución 0,025 molar de sulfato ferroso de fenantrolina (un tinte también llamado a veces "ferroin"). Incorporar una pequeñísima cantidad (aproximadamente un gramo por litro) de, por ejemplo, Triton X-100, un modificador de la tensión superficial o "photoflo" (sustancia empleada en fotografía para los trabajos en el cuarto obscuro) con el fin de reducir la tensión superficial y, por tanto, ayudar a que el fluido pueda extenderse en una capa delgada.

Extender dicha capa de líquido en un recipiente limpio, como pudiera ser, un plato de los que se usan para preparar cultivos. Agite bien la solución y verá cómo, después de cinco minutos más o menos, el color comienza a oscilar. A partir de entonces y de vez en cuando, haga girar suavemente en el plato la solución, dándole vueltas o bien agitándola, suavemente también. Los colores se sucederán con un período de aproximadamente un minuto, aunque el azul sólo permanecerá durante unos cinco o diez segundos cada vez. También aparecerán pequeñas burbujas de dióxido de carbono en la solución: son producto de una de las reacciones involucradas en la oscilación y pueden eliminarse agitando el fluido de vez en cuando.

El hecho de que las concentraciones sean muy exactas no es fundamental, pero en cambio sí debe ponerse mucho cuidado en que los recipientes que se usen estén muy limpios y en procurar que los dedos no toquen la solución ni la superficie de los recipientes que posteriormente estarán en contacto con dicha solución. El cloruro presente en las sales de la piel humana puede entorpecer las reacciones oscilantes.

Antes de usar el bromato sódico en las soluciones, Winfree lo suele recristalizar con el fin de quitarle cualquier impureza que pudiera interferir en las oscilaciones. Dicha recristalización se hace disolviendo bromato sódico hasta la saturación en agua destilada caliente, colocada dentro de un recipiente muy limpio, teniendo cuidado de no poner directamente a la llama nada que esté empapado o bien contenga bromato sódico ya que existe el peligro de una oxidación rápida. Envolver el recipiente cerrado con un material aislante, como por ejemplo Styrofoam, y dejarlo en reposo sin moverlo durante una o dos semanas. Una vez transcurrido dicho tiempo, quítese del recipiente el líquido y, con un instrumento limpio, recójase el bromato sódico que se haya quedado pegado en las paredes y en el fondo del recipiente. El líquido sobrante guárdelo, pues le puede ser útil para otra recristalización.

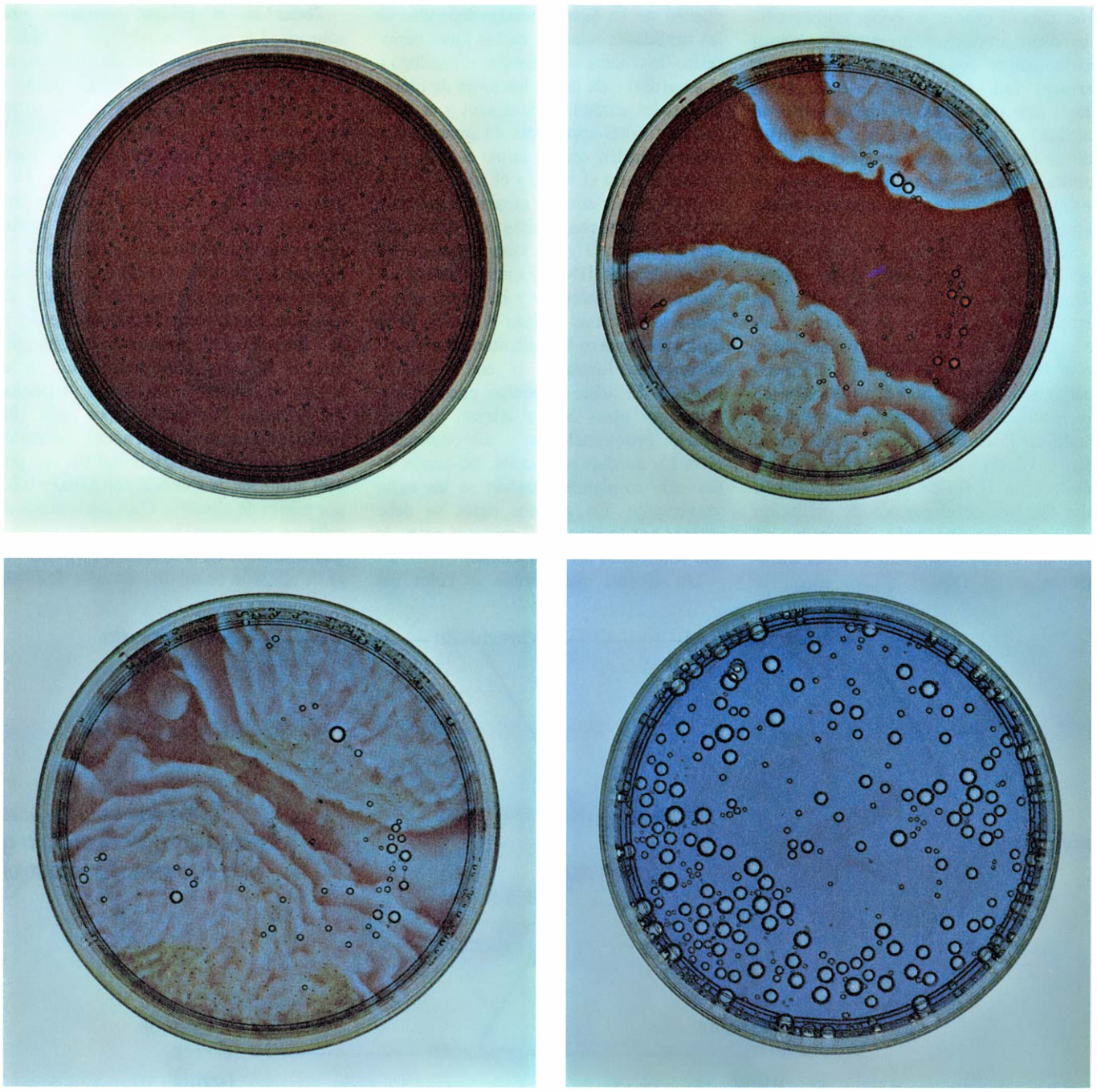
Antes de examinar las posibles variaciones de la mezcla original debo explicar el por qué tienen lugar las oscilaciones de color. Las reacciones que parecen ser las responsables de dichas oscilaciones resultan un tanto complicadas. En solución, tanto el bromuro como el bromato reaccionan con el malonato para formar el

bromomalonato. Si no fuera por un efecto inhibidor del bromuro, el bromato también reaccionaría con el colorante de fenantrolina oxidando el hierro que contiene (quitando un electrón al orbital de electrones más exterior de cada átomo de hierro). El colorante en su estado reducido (ferroso) es rojo mientras que en su estado oxidado (férrico) es azul, de manera que si el bromuro dejase de inhibir la oxidación, la solución pasaría del rojo al azul.

Esto es exactamente lo que llega a suceder, ya que el bromuro es casi totalmente consumido por reacción con el malonato. Entonces puede llevarse a cabo la oxidación, el colorante de fenantrolina se oxida y la solución toma un color azul en lugar del rojo que tenía.

¿Por qué vuelve a tomar luego el color rojo? El bromomalonato que se ha producido y el que aún se puede producir reduce la forma férrica de nuevo a la forma ferrosa (reducción es lo opuesto a oxidación). La solución, como consecuencia, se torna de nuevo roja. Por otra parte, se produce más bromuro a partir del bromomalonato en la reacción de manera que la inhibición de la reacción de oxidación por el bromato del colorante se vuelve a producir. Rápidamente el bromuro se consume de nuevo y el ciclo se reanuda. Las oscilaciones continúan durante una hora más o menos, hasta que la solución se queda ya fija en rojo o en azul, dependiendo de las concentraciones iniciales.

Winfree ha descrito algunas modificaciones que se pueden introducir en la mezcla de partida o básica. Para ensayar con ellas hay que estar familiarizado con los términos molar y normal aplicados a las soluciones. El término molar se basa en el peso atómico de la molécula o del ion complejo que se pone en solución. En una solución uno molar el número de gramos de soluto que se ponen en un litro de



Oscilador de masa de Arthur T. Winfree modificando su color del rojo al azul

solución es igual al peso molecular del soluto (expresado en unidades de peso atómico). La concentración de un producto suele ir impresa en el recipiente que lo contiene. La fenantrolina se vende normalmente a la concentración que se requiere. Una solución normal resulta similar a una solución molar pero su concentración es además proporcional al número de carga del ion que produce la molécula al disociarse. Por ejemplo, una solución dos normal de sulfúrico es a la vez una solución uno molar, debido a que una vez puesto en solución la molécula de ácido sulfúrico libera dos átomos de hidrógeno con una carga neta de más dos.

Ahora veamos las variaciones de Winfree. Una de ellas es no poner bromuro (si bien dicho producto se producirá cuando el bromomalato reduzca a la fenantrolina ferrosa). Las oscilaciones de color serán ahora más frecuentes, ya que es menor la cantidad de bromuro que hay que consumir en cada ciclo antes de que el efecto de inhibición de la oxidación del hierro se elimine y el color de la solución pueda cambiar al azul.

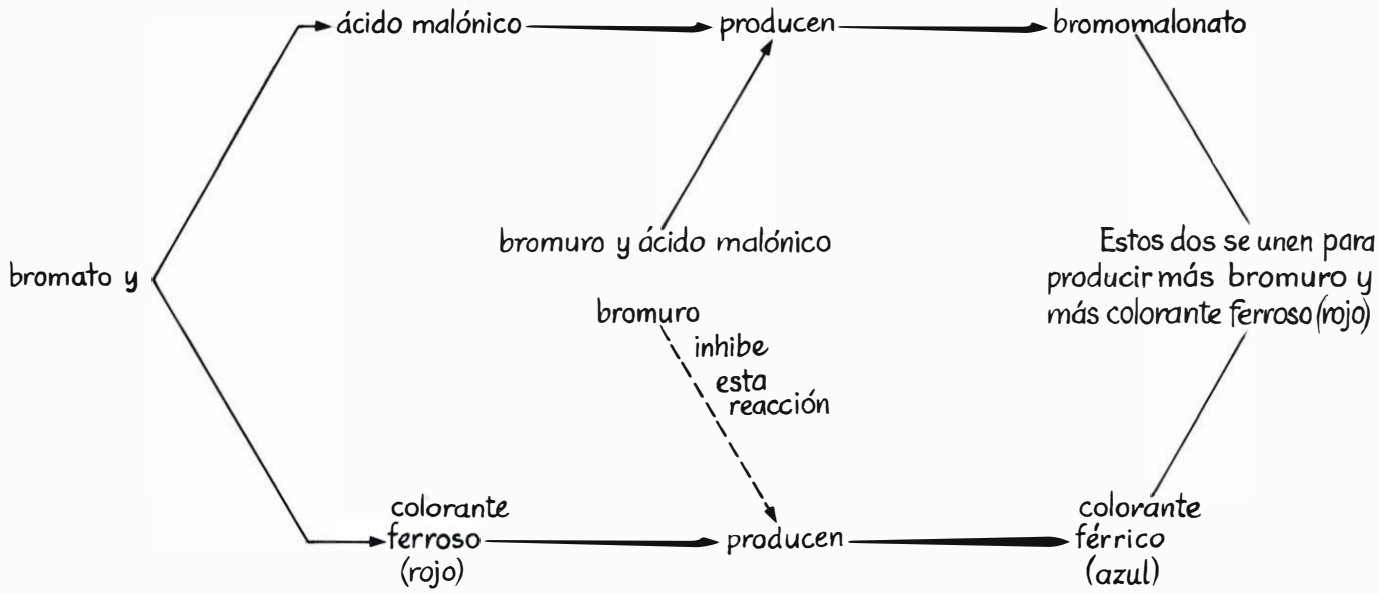
Se puede dar mayor intensidad a las oscilaciones, y así poder verlas mejor, reemplazando en la solución algo del ferroin por sulfato cérico 0,1 molar. Si no se quieren usar ácidos que manchen, por si se producen derrames durante el experimento, se puede sustituir el ácido sulfúrico por bisulfato sódico. El investigador puede modificar la temperatura de la solución o bien la concentración de los ingredientes básicos con el fin de ver cómo influyen tales factores en el período de oscilación (los profesores que estén interesados en proponer estas investigaciones a sus alumnos en el laboratorio pueden encontrar ayuda en el trabajo de John F. Lefelhocz de la Virginia Commonwealth University, cuya referencia se da en la sección de bibliografía de esta revista).

Además de las mezclas de Winfree otras pueden también producir oscilaciones de color. Las reacciones descubiertas por Belousov se basan en el sistema cérico-cerio en lugar de en el férrico-ferroso; la transición tiene lugar del incoloro al amarillo y a la inversa. Richard J. Field, de la Universidad de Montana, sugiere añadir ferroin para dar más realce a la variación del rojo al azul. Las concentraciones que él recomienda para una realización demostrativa se indican en la ilustración superior de la página siguiente. Los colores que se pueden ver en dichas mezclas dependen de las cantidades relativas de los iones cerio-cérico (los cuales oscilan entre el incoloro y el amarillo) y de las de los iones de hierro (los cuales oscilan entre el azul y el rojo) con cantidades apropiadas de amarillo; los colores pueden oscilar entre el azul y el violeta o entre el verde y el rojo.

Oscilaciones entre el amarillo-castaño y el rosa pueden conseguirse con soluciones de manganeso II y III, sustituyendo a los conjuntos cerio III-IV y hierro II-III de las reacciones de Belousov y de Winfree (los números romanos indican el estado de la ionización: hierro II es un átomo de hierro doblemente ionizado, o en el estado ferroso). El ácido malónico puede sustituirse por otros ácidos: cítrico, maleico, málico, bromomalónico y dibromomalónico. En muchas soluciones, las oscilaciones sólo comienzan cuando se las agita suavemente. En algunos casos se debe esperar por lo menos 40 minutos antes de que comiencen las oscilaciones.

Un sistema que cambie su color del incoloro al dorado luego al azul y vuelva otra vez al incoloro para repetir el ciclo puede obtenerse a un costo relativamente bajo con el reloj de yodo, descrito por Thomas S. Briggs y Warren C. Rauscher de la Galileo High School de San Francisco. Yo puse las concentraciones (en agua destilada) que ellos decían en tres recipientes distintos y las tripliqué con el fin de tener claro la cantidad de productos químicos a echar en cada uno de los recipientes. Los recipientes deberán contener todos igual cantidad, de manera que al verter el contenido de todos en un recipiente único se obtendrán las concentraciones establecidas por Briggs y Rauscher.

Poner en el primer recipiente una solución 3,6 molar de peróxido de hidrógeno, preparada añadiendo 40 mililitros de peróxido de hidrógeno al 30 por ciento a 60 mililitros de agua. *Se debe tener extremo cuidado al manejar el peróxido de hidrógeno.* En el segundo recipiente mezclar iodato potásico 0,201 molar (4,3 gramos por 100 mililitros de solución con agua) y ácido perclórico 0,159 molar preparado añadiendo a 2,3 mililitros de 70 por ciento de ácido perclórico agua suficiente como para obtener 100 mililitros de solución. Probablemente deberá calentar la solución de iodato potásico para conseguir que se disuelva completamente. En el tercer recipiente poner ácido malónico 0,150 molar (1,5 gramos por cada 100 mililitros de solución con agua), sulfato de Manganeso (II) 0,0201 molar (0,3 gr por 100 mililitros de solución con agua) y 0,03 por ciento de almidón. (Los porcentajes se refieren al porcentaje en peso del componente presente en la solución. Es decir, 0,3 gr de almidón en un litro de agua destilada



Reacciones en el oscilador de Winfree

equivale a una solución con el 0,03 por ciento de almidón.)

Cuando lo tenga todo preparado para observar las oscilaciones mezcle cantidades iguales de cada una de las tres soluciones. El azul se presentará debido al complejo azul de almidón que se irá formando periódicamente conforme la concentración de ioduro se aproxime a su valor máximo. Briggs y Rauscher obtenían oscilaciones más cortas cuando sustituían el ácido malónico con 2,4 pentadiona. Las oscilaciones son más rápidas si se reemplaza el manganeso por cerio.

Para obtener grandes oscilaciones de color en la mayoría de las mezclas la solución debe ser agitada de forma continua (con un agitador magnético si se tiene acceso a alguno) o bien se ha de hacer girar el recipiente también de forma continua. Además de los anteriores, también tiene lugar en estas soluciones otros fenómenos de entre los cuales uno de los más interesantes es el que ha sido estudiado a fondo por Winfree y que son las ondas de color que aparecen sobre y en la solución, las cuales se propagan a su través a una velocidad de unos cuantos milímetros por minuto, girando alrededor de su punto de origen, destruyéndose al chocar una con otra y describiendo una gran variedad de formas: anillos, elipses y espirales.

Para dar un mayor realce a estas ondas de color (disminuyendo las oscilaciones en masa) Winfree sugiere usar más bromuro y menos ácido sulfúrico en la mezcla que sirve de base. Por ejemplo, en la solución de bromato sódico usar un mililitro de ácido sulfúrico concentrado y 67 mililitros de agua destilada.

Para que las ondas se puedan ver mejor, poner un poco de la solución en un recipiente que tenga como un milímetro de fondo, un plato por ejemplo, para preparar cultivos de plástico. El recipiente debe estar muy limpio ya que cualquier pequeña mota de suciedad o raspadura pueden provocar la formación de burbujas de dióxido de carbono durante el experimento y, como consecuencia, generar demasiadas ondas a la vez. El contraste visual se mejora si se sitúa el plato sobre otro plato que contenga sulfato de cobre azul con unas cuantas gotas de ácido sulfúrico; el conjunto de los dos platos se coloca sobre una luz. La solución del plato inferior absorberá el calor emitido por la luz impidiendo así que dicho calor interrumpa o destruya las ondas que se forman en la solución del plato superior. El plato se debe cubrir con su tapa, para así proteger las ondas de las corrientes de aire y eliminar además la evaporación. Deje el plato en reposo sin que nada lo mueva. Si las ondas no comienzan a formarse a los pocos minutos, toque la solución con una aguja caliente, ésta las hará aparecer. Normalmente habrá en la solución burbujas o motas de polvo capaces de hacer aparecer algunas ondas.

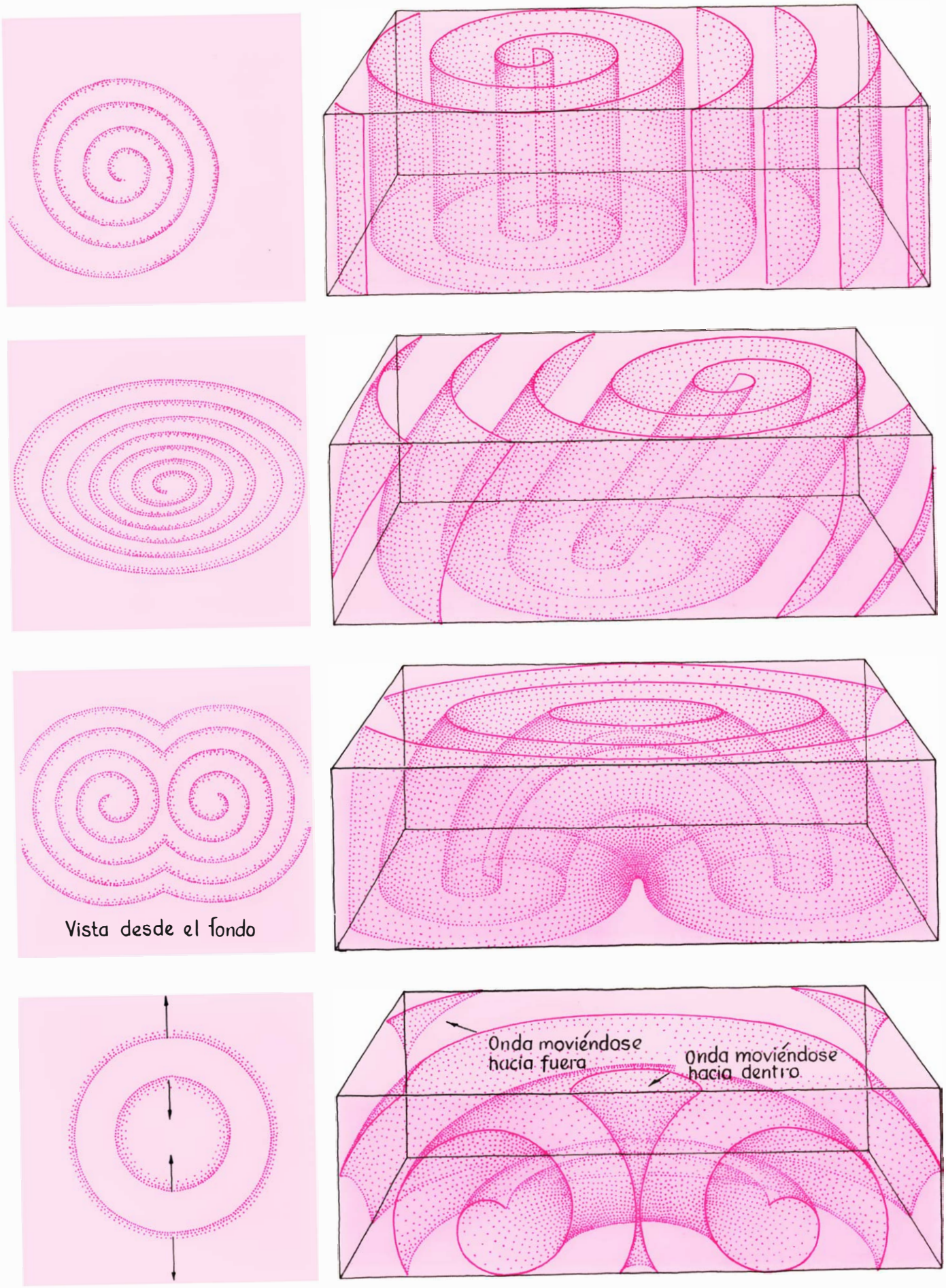
Reactivos	Rangos de concentraciones (molar):	Concentración (molar) adecuada:
Acido malónico	0,0125 — 0,5	0,275
Nitrato de amonio y cerio	0,0001—0,01	0,002
Acido sulfúrico	0,5 — 2,5	1,5
"Ferroin"	0,0006	0,0006
Bromato potásico	0,03—0,0625	0,0625

Concentraciones de Richard J. Field para el oscilador de cerio

Es de suponer que las ondas provienen del mismo proceso químico que provoca las oscilaciones de color de toda la masa. La solución permanece roja con alguna concentración de equilibrio de bromuro. Una vez que la mezcla ha sido alterada por una burbuja, una raspadura, una mota de polvo o una aguja caliente, parte de la solución consume su bromuro. El bromato puede entonces cambiar el color de la solución a azul oxidando el hierro de la fenantrolina. Esta conversión se propaga hacia fuera como una onda ya que a medida que la difusión transporta bromuro de la zona roja inmediatamente exterior al anillo azul a la zona azul, se consume el bromuro adicional y la zona antes roja se vuelve azul. Una vez que el anillo azul ha pasado una zona determinada, la solución vuelve a recuperar su tono rojo a medida que el bromomalonato reduce el hierro de la fenantrolina y desprende más bromuro.

Las ondas son realmente químicas más que hidrodinámicas, ya que el fluido no se mueve. Más aún, no reflejaría las barreras colocadas a su paso y las ondas movién-

Modelos de onda en espiral en una mezcla de Winfree sin agitar



Tipos de ondas espirales

dose en direcciones opuestas no pasarían unas a través de las otras.

El experimentador podrá comprobar que las ondas, que tienen una longitud de unos cuantos milímetros, toman distintas formas. Entre ellas encontramos las de anillos cerrados, concéntricos formando un ojo de buey, con la aparición de nuevos anillos en el centro a intervalos regulares; estos modelos no giran. Otras ondas forman espirales, cada una de las cuales tienen el mismo período de duración, más corto que ninguno de los períodos del modelo de círculos cerrados. Estos modelos en espiral sí son giratorios. Si el eje de rotación es perpendicular a la superficie de la solución se propagan ondas en forma de voluta (como las llamó Winfree) desde el eje, produciendo una estructura en espiral alrededor de una región central que rodea a la parte alta del eje según se mira desde arriba. La estructura es técnicamente una espiral, que se podría dibujar de forma mecánica con un lapicero atado a una cuerda que se va desenrollando de un cilindro central en lugar de hacerlo desde un solo punto. En la espiral química el núcleo central tiene menos de un milímetro de diámetro.

Si la solución es suficientemente profunda (más profunda que el núcleo de la espiral) el eje puede permanecer inclinado hacia un lado. Desde arriba se verán entonces espirales alargadas rodeando la parte central del modelo. En una solución de profundidad adecuada el eje de la voluta puede doblarse para formar una U con su parte superior en una superficie de la solución y la inferior en la otra. Desde una orientación se verán anillos rodeando un punto central. Si la forma de U huye de la superficie que tiene los anillos, éstos desaparecen en esa superficie justo antes de convertirse en círculos completos. Cuando el eje de rotación resulta paralelo a una superficie y en un anillo cerrado, la superficie tiene círculos concéntricos de los que el más interior se propaga hacia dentro y el más externo se propaga hacia fuera.

Si quisiéramos poner barreras al paso de la onda, sería mejor usar una solución más viscosa. Esta se puede conseguir añadiendo dos mililitros de dióxido de silicio coloidal por cada mililitro de solución. Winfree afirma que la solución resultante tiene una consistencia similar a la mantequilla de cacahuete.

Se pueden proteger los modelos y sacarlos de la solución poniendo filtros en la misma. La formación y propagación de las ondas no se alteran por el uso de filtros. Hay que evitar la contaminación de la solución al poner dentro los filtros; para ello deben usarse pinzas de nylon y no se deben tocar los filtros con los dedos. Si se calientan primero los filtros (incluso con el calor del cuerpo) los modelos que se producen son más activos.

Una vez que la solución ha sido absorbida por un filtro, Winfree quita el filtro y lo pone entre dos hojas de plástico (sirven las de envolver comestibles), lo coloca después en aceite para reducir la evaporación y desechar el oxígeno o lo pega a la parte interior de la tapa de un plato de plástico. El filtro se puede usar de nuevo si se aclara bien con agua.

Cuando Winfree introduce un filtro en aceite, puede hacer un juego con las ondas químicas tocando levemente el filtro a través de la película de aceite con un trozo de hierro, como, por ejemplo, el borde de una cuchilla de afeitar. La capa roja resultante, que denomina "la cortina de hierro", bloquea las ondas en esa región durante varios segundos. El tono rojo resulta, aparentemente, del hecho de que el ácido de la solución extrae hierro en estado ferroso de la cuchilla.

Quizás el observador desee fotografiar las ondas a medida que se van desarrollando. Se pueden también fijar en un filtro siguiendo un procedimiento diseñado por Winfree (éste no funcionará con un filtro que haya sido puesto en aceite). Cuando las ondas se estén propagando a través del filtro, se debe retirar éste y ponerlo en agua salada saturada muy fría al objeto de paralizar la reacción. Deje el filtro allí durante cinco minutos (hasta que todos los productos químicos se hayan disuelto excepto la fenantrolina de color rojo ferroso), después séquelo e introdúzcalo en una solución de yoduro sódico (un gramo por cada 40 mililitros de solución con agua) y séquese de nuevo. Después se dejará durante 10 minutos en el vapor de yoduro emanante de una botella conteniendo cristales de yoduro. Este procedimiento fija permanentemente el ferroin.

Enjuáguese el filtro en agua destilada, séquese al aire y aclárese haciéndolo flotar en aceite de parafina; habrá que secarlo otra vez y, finalmente, arroparlo entre dos hojas de plástico adhesivo claro. Winfree afirma que los modelos de ondas químicas preservadas de esta forma han durado años con total agudeza. La conservación durante un día más o menos puede conseguirse de una forma más sencilla sumergiendo los filtros en una solución muy fría de ácido perclórico al 3 por ciento, pero la agudeza disminuye algo y el modelo desaparece cuando el filtro se seca completamente.

Si se desarrollan ondas en un paquete de filtros (se necesitan por lo menos tres por paquete para conseguir las estructuras alargadas), se pueden separar entre sí (como hizo Winfree) para ver las estructuras verticales de las ondas. De esta forma se puede seguir el eje de voluta hacia abajo o desdoblar una estructura en forma de *U*. Las burbujas de dióxido de carbono pueden ser un estorbo si separan los filtros, lo cual ocurre a los cinco minutos más o menos.

Un paquete de filtros Millipore llevan a un mejor entendimiento del anillo de voluta horizontal. En este anillo el eje de la voluta es horizontal y se cierra sobre sí mismo para formar un círculo. Coloque un paquete de cinco filtros en la solución y toque el centro del filtro superior con una aguja caliente para iniciar una onda cilíndrica. Una vez que la onda se ha propagado hacia el exterior, a través del filtro superior haga descender otro grupo de cinco filtros sobre el primer paquete, con el nuevo grupo en el estado rojo inicial de la solución. Pronto aparecerá una onda cilíndrica en la parte alta del nuevo grupo y el círculo se romperá en dos partes, una se moverá hacia dentro y la otra hacia fuera. Cuando se coloca el nuevo paquete de filtros en su sitio, la onda de voluta en el paquete inicial entra en el nuevo paquete y puede llegar a aparecer en lo alto del mismo.

Winfree tiene otra técnica que emplea para preparar los filtros en una demostración. Con ese fin deben mezclarse bromomalonato de amonio uno molar con un volumen igual de fenantrolina ferrosa 0,025 molar. Esta mezcla se combinará con un volumen igual de bisulfato de amonio 4 molar. (46 gramos por cada 100 mililitros de solución con agua.) Coloque un filtro Millipore en la solución, levántelo para que escurra el líquido de la superficie y después póngalo en una superficie de plástico para que se seque. Mientras tanto, ponga un filtro de papel Whatman nº 1 en bromato sódico 0,33 molar (cinco gramos por cada 100 mililitros de solución con agua) y después séquelo. Cuando se quieran demostrar las ondas de voluta, debe mojarse el filtro con agua pura, colocarlo en una superficie limpia (en un plato de plástico) y cubrirlo con el filtro Millipore. Después de esperar unos minutos se verán puntos azules en el filtro de arriba; quizá se vean también ondas azules propagándose a través del filtro a una velocidad de varios milímetros por minuto.

Por 4 dólares puede comprarse una muestra de un filtro Millipore de unos 30 centímetros ya impregnada con los productos químicos para que genere ondas en Winfree (Arthur T. Winfree, Institute for Natural Philosophy, 51 Knoll Crest Court, West Lafayette, Ind. 47906). Se debe enviar una etiqueta con la propia dirección al hacer el pedido. El filtro sólo

necesita ser mojado para que pueda trabajarse con él 30 minutos. El filtro se puede calentar, enfriar, cortar con tijeras, tocar con un objeto de hierro para bloquear las ondas, estimular con una aguja caliente y apilarlo para hacer ondas tridimensionales.

¿Cómo puede una solución mezclada uniformemente a temperatura y presión constantes oscilar de color, de concentración de especies moleculares, de conductividad o de cualquier otra cosa? Esta pregunta ha venido preocupando a los químicos desde el siglo XIX. Las oscilaciones son todavía debatidas y algunos químicos siguen diciendo que las oscilaciones en tales circunstancias son imposibles. En términos científicos la pregunta es, ¿pueden producirse oscilaciones en un sistema homogéneo y cerrado a temperatura y presión constantes? Se sabe que las oscilaciones pueden producirse en medios que tengan constituyentes no homogéneos y gradientes de densidad en las especies moleculares que están sufriendo difusión. Se sabe asimismo que las oscilaciones pueden aparecer si el sistema está abierto a la adición de más materiales. Sin embargo, en las oscilaciones de masa, las oscilaciones se producen, al parecer, en un sistema que es homogéneo y cerrado.

Para desvelar el problema algunos investigadores se concentran en la energía libre de Gibbs del sistema, porque cualquier reacción espontánea en el sistema homogéneo y cerrado a temperatura y presión constantes debe hacer disminuir la energía libre de Gibbs en el sistema. La energía libre de Gibbs es un indicador de la espontaneidad de una reacción (la tendencia de la reacción a continuar por sí misma sin activación externa). En cualquier reacción espontánea, el sistema tiende a reducir su energía (medida por la entalpía) y a incrementar su desorden (medida por la entropía). No es inevitable que ambos extremos puedan ser alcanzados. Por ejemplo, algunas reacciones pueden ser capaces de continuar espontáneamente aun cuando su energía (entalpía) se incremente; la razón es porque el desorden (entropía) se incrementa aún más. Otras reacciones pueden ser espontáneas por la razón opuesta. Así pues, ni la entalpía ni la entropía son buenos indicadores de espontaneidad por sí mismos. Lo que se usa es una combinación de las dos, llamada la energía libre de Gibbs. Cualquier reacción que reduzca la energía libre de Gibbs es aquella que se continúa espontáneamente.

En principio las reacciones de oscilación que he descrito parecen violar la regla universalmente aceptada de que cualquier reacción espontánea debe moverse firmemente hacia su estado del equilibrio final mientras va perdiendo su energía libre de Gibbs. De hecho, las oscilaciones parecen violar la segunda ley de la termodinámica, que prohíbe las oscilaciones en torno al punto de equilibrio. No obstante, la paradoja se resuelve muy fácilmente observando que no hay ninguna ley termodinámica que impida las oscilaciones cuando los reactivos están lejos de equilibrio y a medida que las reacciones netas hacen decrecer la energía libre de Gibbs. Así, en la mezcla de Winfree las reacciones químicas netas consumen muy poco bromato y ácido malónico en cada ciclo de oscilación y los ciclos con los reactivos muy alejados de sus valores de equilibrio finales. En el constante proceso de las reacciones netas hacia el equilibrio, las concentraciones de los componentes menores bromuro y fenantrolina pueden variar considerablemente, aunque permanecen bajas con relación a las concentraciones de bromato y ácido malónico. Con el tiempo, el bromato y el ácido malónico se consumen en las reacciones netas lo suficiente para que el proceso total se pare y todas las concentraciones estén en equilibrio. Así pues, la solución puede oscilar en la concentración de sus especies (con cambio de color en el caso que nos ocupa) siempre que los principales reactivos estén en abundancia y lejos de las concentraciones finales de equilibrio. Una vez que se ha alcanzado el estado de equilibrio cesarán las oscilaciones. No se viola pues la segunda ley de la termodinámica.

Deben existir otros equisitos para que una solución sea capaz de oscilar; de lo contrario, una clase de química sería mucho más colorista. Las reacciones que tienen lugar deben ser complejas, y al menos una debe catalizarse a sí misma (o sea, ser autocatalítica), y enlazarse con las otras reacciones de alguna forma tal como una dependencia de las concentraciones en las otras reacciones o por una inhibición o activación de las reacciones. Este enlace con otras reacciones es común llamarlo realimentación (feedback) y es muy característico de los sistemas de oscilación.

En la mezcla de Winfree el acoplamiento se hace por medio del ion bromuro y la fenantrolina. El bromuro reacciona con el ácido malónico, inhibe la reacción de bromato con la fenantrolina ferrosa y es un producto de la reacción de bromomalonato y fenantrolina férrica. La reacción del bromato con ácido malónico es una reacción autocatalítica. No estoy seguro de que en otros ejemplos de osciladores básicos, como el reloj de yodo por ejemplo, los complicados mecanismos causantes de las oscilaciones hayan sido todavía resueltos y entendidos en términos de termodinámica.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MONOPOLOS

ON THE DIRAC MAGNETIC POLES. E. Amaldi y N. Cabibbo en *Aspects of Quantum Theory,* dirigido por Abdus Salam y E. P. Wigner. Cambridge University Press. 1972.

HYPOTHETICAL PARTICLES. A. S. Goldhaber y J. Smith en *Reports in Progress in Physics,* vol. 38, pág. 731, 1975.

NEW DEVELOPMENTS IN THE THEORY OF MAGNETIC MONOMOPOLES. P. Goddard y D.I. Olive. Preprint CERN TH. 2445-1977.

LA DIFERENCIACION QUIMICA DE LAS CELULAS NERVIOSAS

CHEMICAL TRANSMISSION BETWEEN RAT SYMPATHETIC NEURONS AND CARDIAC MYOCYTES DEVELOPING IN MICROCULTURES: EVIDENCE FOR CHOLINERGIC, ADRENERGIC, AND DUAL-FUNCTION NEURONS. Edward J. Furshpan, Peter R. MacLeish, Paul H. O'Lague y David D. Potter en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 73, n.º 11, págs. 4225-4229; noviembre, 1976.

RAT SYMPATHETIC NEURONS AND CARDIAC MYOCYTES DEVELOPING IN MICROCULTURES: CORRELATION OF THE FINE STRUCTURE OF ENDINGS WITH NEUROTRANSMITTER FUNCTION IN SINGLE NEURONS. Story C. Landis en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 73, n.º 11, págs. 4220-4224; noviembre, 1976.

NEUROTRANSMITTER SYMPATHETIC AND UPTAKE BY ISOLATED SYMPATHETIC NEURONS IN MICROCULTURES. Louis F. Reichardt y Paul H. Patterson en *Nature,* vol. 270, n.º 5633, págs. 147-151; 10 de noviembre de 1977.

DETERMINATION OF TRANSMITTER FUNCTION BY NEURONAL ACTIVITY Patricia A. Walicke, Robert B. Campenot y Paul H. Patterson en *Proceedings of the National Academy of Sciences,* vol. 74, n.º 12, págs. 5767-5771; diciembre, 1977.

NATURE AND NURTURE IN DEVELOPMENT OF THE AUTONOMIC NEURON. Richard P. Bunge, Mary Johnson y C. David Ross en *Science,* vol. 199, n.º 4336, págs. 1409-1416; 31 de marzo de 1978.

LOS RAYOS COSMICOS DE MAXIMA ENERGIA

COSMIC-RAY SHOWERS. Kenneth Greisen en *Annual Review of Nuclear Science:* vol. 10, dirigido por Emilio Segrè, Gerhart Friedlander y Walter E. Meyerhof. Annual Reviews. Inc., 1960.

COSMIC RAYS. Bruno Rossi. McGraw-Hill Book Company, 1964.

COSMIC RAYS AT GROUND LEVEL. Dirigido por A. W. Wolfendale. The Institute of Physics, Londres, 1973.

IMAGENES NOCTURNAS DE LA TIERRA VISTA DESDE EL ESPACIO

MISSION TO EARTH: LANDSAT VIEWS THE WORLD. Nicholas M. Short, Paul D. Lowman, Jr., Stanley C. Freden y William A. Finch. NASA SP-360. U.S. Government Printing Office, 1976.

APRENDIZAJE Y MEMORIA DE LAS ABEJAS

DAS GEDACHTNIS DER HONIGBIENE FÜR SPEKTRALFARBEN, I: KURZZEITIGES UND LANGZEITIGES BEHALTEN. Randolf Menzel en *Zeitschrift für vergleichenbe Physiologie,* vol. 63, págs. 290-309; 1969.

THE DINAMICS OF LEARNING IN THE HONEYBEE. Jochen Erberen en *Journal of Comparative Physiology,* vol. 99, n.º 3, págs. 231-255; 1975.

NEURAL MECHANISMS OF LEARNING AND MEMORY. Dirigido por Mark R. Rosenzweig y Edward L. Bennett. The MIT Press, 1976.

LA TECNOLOGIA DE LAS MEMBRANAS SINTETICAS

MEMBRANE PROCESSES IN INDUSTRY AND BIOMEDICINE. Dirigido por Milan Bier. Plenum Press, 1971.

POLYMERIC MEMBRANES. R. E. Kesting. McGraw-Hill Book Company, 1971.

INDUSTRIAL PROCESSING WITH MEMBRANES. Dirigido por Robert E. Lacey y Sidney Loeb. Wiley-Interscience, 1972.

REVERSE OSMOSIS MEMBRANE RESEARCH. Dirigido por H. K. Lonsdale y H. E. Podall. Plenum Press, 1972.

EL KIWI

PHYLOGENY AND EVOLUTION OF THE RATITE BIRDS. Joel Cracraft en *Ibis: A Quarterly Journal of Ornithology,* vol. 116, págs. 494-521; 1974.

THE AVIAN EGG: INCUBATION TIME AND WATER LOSS. Hermann Rahn y Amos Ar en *Condor,* vol. 76, n.º 2, págs. 147-152; verano, 1974.

THE KIWI. Brian Reid y Gordon Williams en *Biogeography and Ecology in New Zealand,* dirigido por G. Kuschel. Dr. W. Junk B. V. Publishers, La Haya, 1975.

INCUBATION TEMPERATURES OF THE NORTH ISLAND BROWN KIWI. Barry Rowe en *Notornis,* en prensa.

POKER COMPUTERIZADO

GENERALIZATION LEARNING TECHNIQUES FOR AUTOMATING THE LEARNING OF HEURISTICS. D. A. Waterman en *Artificial Intelligence,* vol. 1 págs. 121-170; primavera, 1970.

STUDIES ON DECISION MAKING USING THE GAME OF POKER. Nicholas V. Findler, Heinz Klein, William Gould, Alexander Kowal y John Mening en *Information Processing 71. Proceedings of IFIP Congress 71, Vol. 2: Applications,* dirigido por C. V. Freiman. North-Holland Publishing Company, 1972.

STUDIES IN MACHINE COGNITION USING THE GAME OF POKER. Nicholas V. Findler en *Communications of the ACM,* vol. 20, págs. 230-245; 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

THE CATEGORIES OF CHARLES PEIRCE. Eugene Freeman. Open Court, 1934.

THE PHENOMENOLOGY OF CHARLES S. PEIRCE: FROM THE DOCTRINE OF CATEGORIES TO PHANEROSCOPY. William L. Rosensohn. B. R. Grüner, 1974.

TALLER Y LABORATORIO

THE COLOR BLIND TRAFFIC LIGHT. John F. Tefelhocz en *Journal of Chemical Education,* vol. 49, n.º 5. págs. 312-314; mayo, 1972.

OSCILLATING CHEMICAL REACTIONS IN HOMOGENEOUS PHASE. Hans Degn en *Journal of Chemical Education,* vol. 49, n.º 5, págs. 302-307; mayo, 1972.

A REACTION PERIODIC IN TIME AND SPACE. Richard J. Field en *Journal of Chemical Education,* vol. 49, n.º 5, págs. 308-311; mayo, 1972.

AN OSCILLATING IODINE CLOCK. Thomas S. Briggs y Warren C. Rauscher en *Journal of Chemical Education,* vol. 50, n.º 7, págs. 496; julio, 1973.

Taller y laboratorio

Ideas sobre cómo pulir cristales a mano y cómo mejorar la eficacia de las chimeneas caseras

Jearl Walker

Aunque la industria óptica tiene una maquinaria muy avanzada con la que pulir cristales para la fabricación de lentes y espejos, muchos aficionados a la óptica instrumental prefieren pulir sus cristales a mano. La técnica empleada se llama pulido con abrasivo libre, y consiste en restregar un objeto duro, con un movimiento al azar, sobre un lecho fino de arenilla abrasiva, que está situado sobre el objeto a pulir. Normalmente se empieza empleando una arena gruesa y, progresivamente, se va cambiando a tamaños de arena más fina hasta conseguir que el objeto a pulir tenga el tamaño, la forma y la lisura deseada.

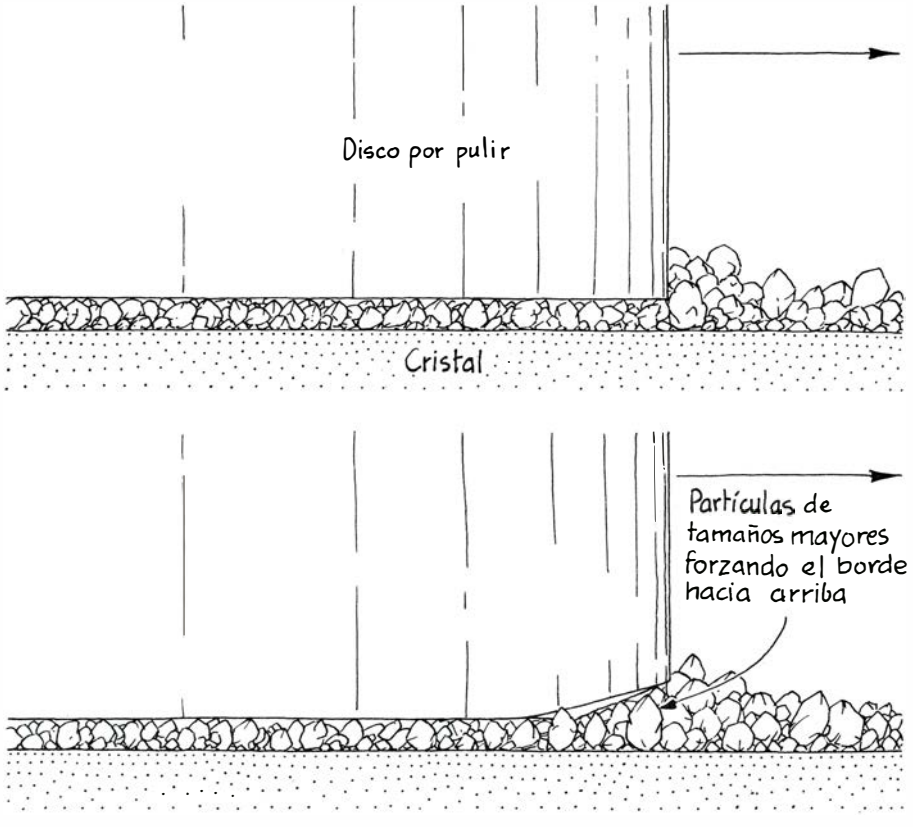
La técnica de pulir presenta dos paradojas interesantes. La primera: ¿Cómo puede, al pulirse una superficie, conseguirse una lisura tal que el objeto pulido sea tan ópticamente bueno que se pueda utilizar como telescopio? Para su resolución hubo que esperar a que se aceptase la naturaleza ondulatoria de la luz; y la respuesta estriba en el cambio de tamaño de la arena que se emplea al pulir. Como antes dijimos, se va progresivamente disminuyendo el tamaño de la misma. Hay una relación muy estrecha entre el tamaño de la arena y la lisura que se obtiene en la superficie del material a pulir. De ahí que se deba ir reduciendo el tamaño del medio abrasivo, durante la operación, hasta que se llegue a un tamaño igual o menor que el de la longitud de onda de la luz, y entonces se obtendrá una superficie lisa y ópticamente correcta.

La segunda paradoja, según tengo entendido, sólo ha sido explicada muy recientemente; en realidad, queda aún mucho trabajo por hacer para confirmar su absoluta comprensión. La cuestión es la siguiente: ¿cómo puede evitarse que el objeto a pulir se raye, teniendo en cuenta que en la distribución de tamaños de cualquier mezcla abrasiva existen por lo menos dos órdenes de magnitudes de los granos, de manera que la mezcla, con seguridad, contendrá algunas partículas relativamente grandes que podrán rayar la superficie del cristal? El pulido con abrasivo libre parece que ha llegado a tener mucho de arte, que depende en gran parte de la experiencia del pulidor y de su sentido del tacto. Quizá por ello, poca gente ha investigado la causa de que no se rayen los cristales.

Recientemente, Edward J. Saccocio, de Columbus (Ohio), desarrolló una idea que parece explicar esta segunda paradoja, al menos en parte. El éxito del pulido con abrasivo libre depende, a buen seguro, de la forma del borde del objeto que se mueve sobre la capa de arena. Normalmente, el utensilio que se emplea está hecho de un metal o de un cristal tanto o más duro que el material que se quiere pulir. Entre ambos colocó una suspensión de arena con agua. Saccocio encontró que el borde frontal del objeto de arriba, es decir del instrumento que pule, determina el tamaño de las partículas que pueden pasar al espacio entre el objeto a pulir y el instrumento pulidor.

Si el borde es cortante, las partículas mayores entrarán con mayor dificultad en el espacio entre el instrumento y el objeto a pulir que si el borde estuviera redondeado. La altura del espacio ocupado por la sílice depende grandemente del tamaño medio de la arena. El rayado se produce cuando una partícula con un tamaño muy superior a la media se introduce en el espacio antes aludido, ya que se clava en una de las superficies y origina una raya en la otra. Por tanto, un instrumento con el borde delantero cortante o afilado producirá, por término medio, menos rayas que otro que tenga el mencionado borde romo o redondeado, ya que ello permitirá que las partículas de tamaños mayores se introduzcan debajo del instrumento pulidor.

Para probar estas ideas sobre las causas y el modo de evitar la formación de rayas, Saccocio diseñó varios experimentos sen-



Incidencia en el pulido de la forma del borde delantero, según sea afilado o redondeado

cillos. Yo los repetí, y el lector puede hacer otro tanto. Aunque también puede usar dichos experimentos como base para posteriores ensayos que le permitan seguir investigando las causas del rayado. El material elegido para ser pulido era un disco de molibdeno (bronce o latón podría ser más conveniente para el lector), como material más duro empleó cristal, y la arena abrasiva era óxido de aluminio, en tres tamaños nominales: 30, 15 y 3 micrometros. El objeto de molibdeno era un cilindro corto de 15 milímetros de diámetro, y se le hizo mover sobre un gran plato de cristal, de forma inversa a como normalmente se trabaja al pulir.

Extendió una arena abrasiva sobre una porción del plato de cristal, a fin de tener un agente pulidor para el disco de molibdeno. Saccocio mezcló el óxido de aluminio con agua para obtener así una suspensión, que es lo que normalmente se emplea en el pulido con abrasivo libre, aunque yo usé arenilla seca. Primero se dejó lisa y sin rayas la superficie del molibdeno, puliéndola con arena de cada uno de los tres tamaños antes citados, usándolos en orden descendente. Moví el cilindro sin rumbo predeterminado sobre la arenilla, aplicando una presión tan uniforme como me era posible. Una de las dificultades del experimento, cosa que requiere experiencia, es determinar qué presión es la adecuada. Una presión demasiado ligera alarga el tiempo necesario para pulir y una presión demasiado grande provoca la aparición de rayas.

Tuve que cambiar la arenilla abrasiva frecuentemente con el fin de evitar el rayado. Quizás esto era debido en parte a que trozos de metal que se habían desprendido del disco contaminaran la arenilla. Además, la cantidad de arenilla situada debajo del disco parecía disminuir.

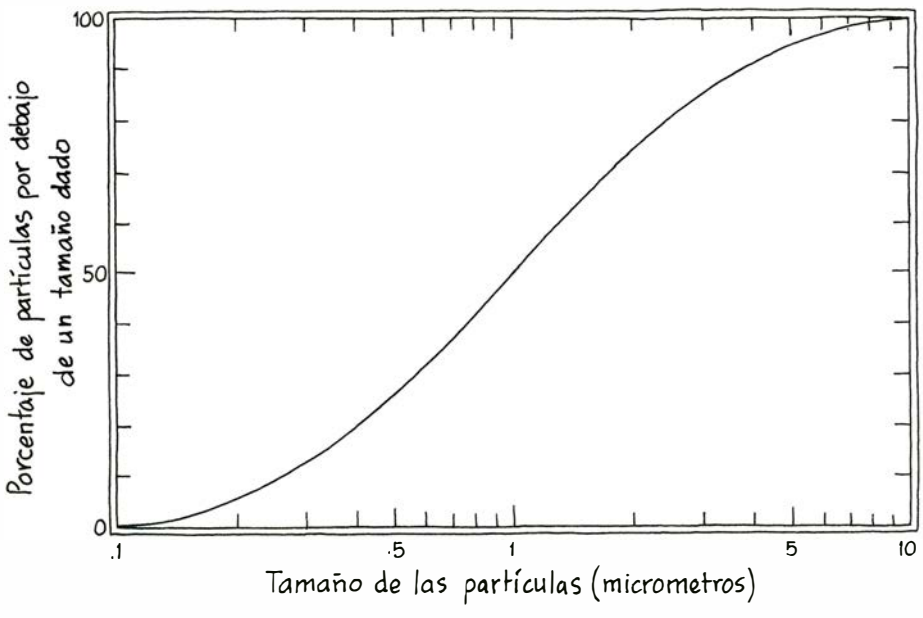
¿Por qué se producían las rayas? Según parece, cuando se aplica una presión excesiva, las partículas no pueden rodar ni girar suavemente entre las dos superficies en movimiento, mientras que las pequeñas porciones de material desprendido y las grandes partículas de la arenilla abrasiva se clavan en una de las dos superficies, rayando la otra. Saccocio cree que esta incrustación ocurre cuando las dos superficies forman entre sí un ángulo determinado, lo cual sucede si la presión no se aplica uniformemente o si el pulido ha devastado ya las superficies que toman formas cóncavas o convexas. Yo mismo podía sentir cuándo una raya comenzaba a formarse: el disco daba un ligero tirón y el sonido del pulido cambiaba notablemente. Con una presión apropiada, las partículas abrasivas pulían la superficie del molibdeno que bien se desprendían molécula a molécula, o bien en trozos de sección en formas de cráteres tan pequeños que no se podían ver. De cualquier manera la abrasión se limitaba a la zona superficial.

Siguiendo las directrices de Saccocio, comprobé la idea de que las partículas mayores eran las que provocaban el rayado. Puse cierta cantidad de arenilla de 30 micrometros en una arenilla que estaba compuesta por los otros dos tamaños más pequeños. Comencé a pulir el disco sobre una zona donde la arenilla no estaba mezclada con la de tamaño superior; luego, sin levantar el disco, lo llevé a la zona donde la arenilla tenía la mezcla con la de tamaño superior. Cuando en esta zona había cantidades iguales de arenilla de los dos tamaños, mezclados de la manera más homogénea posible, el rayado no fue más frecuente de lo que era natural. Pero repetí el experimento poniendo menos cantidad de arenilla del tamaño de 30 micrometros, manteniendo la misma cantidad de arenilla fina; y el rayado pareció hacerse más frecuente.

En cada uno de los ensayos procuré mantener aproximadamente la misma presión sobre el disco. Seguramente, algunas variaciones que se producían en la frecuencia del rayado eran debidas a que no conseguí hacerlo con la suficiente precisión. Resulta bastante claro que si las partículas grandes estaban presentes en una pequeña porción, ellas eran probablemente las causantes del rayado. Al parecer, en tales casos, la abertura existente entre el disco y el cristal depende en buena medida de la arenilla más pequeña. Si las partículas entran en dicho espacio, deben forzar el disco hacia arriba. Como entonces el disco quedaría apoyado en menos sitios, los puntos de contacto de dichas partículas grandes deben soportar una presión mayor. Esa presión mayor en los pocos sitios donde están las partículas grandes es la que hace que dichas partículas se claven y rayen las superficies.

A continuación me puse a restregar el disco solamente en una dirección. A cada uno o dos movimientos, levantaba y soplaba la superficie del disco para quitar la arenilla y poder examinarla. De esta manera pude conocer dónde comenzaba el rayado y dónde se detenía. Algunas de las rayas se iniciaban en los bordes delanteros del disco, otras, en lugares indistintos dentro del perímetro del mismo. Y otras se diría que comenzaban con un surco bastante ancho y luego se estrechaban. Este estrechamiento podía deberse a la fractura de la partícula que estaba causando la raya. Otros surcos parecían mantener aproximadamente la misma anchura al menos cuando los observaba con una simple lupa. Todos los surcos eran notablemente más anchos que las partículas. Se puede suponer que la punta de una partícula abrasiva está clavada en una superficie en movimiento y que en el transcurso del movimiento ulterior aprieta y distorsiona una amplia área de esta superficie antes de que la distorsión sea lo suficientemente grande para rasgarla. Es posible que algunas rayas puedan ser estrechas al principio y luego ir aumentando en anchura si la partícula abrasiva va cavando progresivamente la superficie en movimiento, si bien no he podido encontrar ninguno de esos trazos.

El hecho de que algunas rayas se den en los bordes y otras en el interior se debe, quizás, al azar. Las partículas que provocan las rayas no están redondeadas (probablemente no rayarían si así fuera); muy al contrario, tienen puntas afiladas. Es



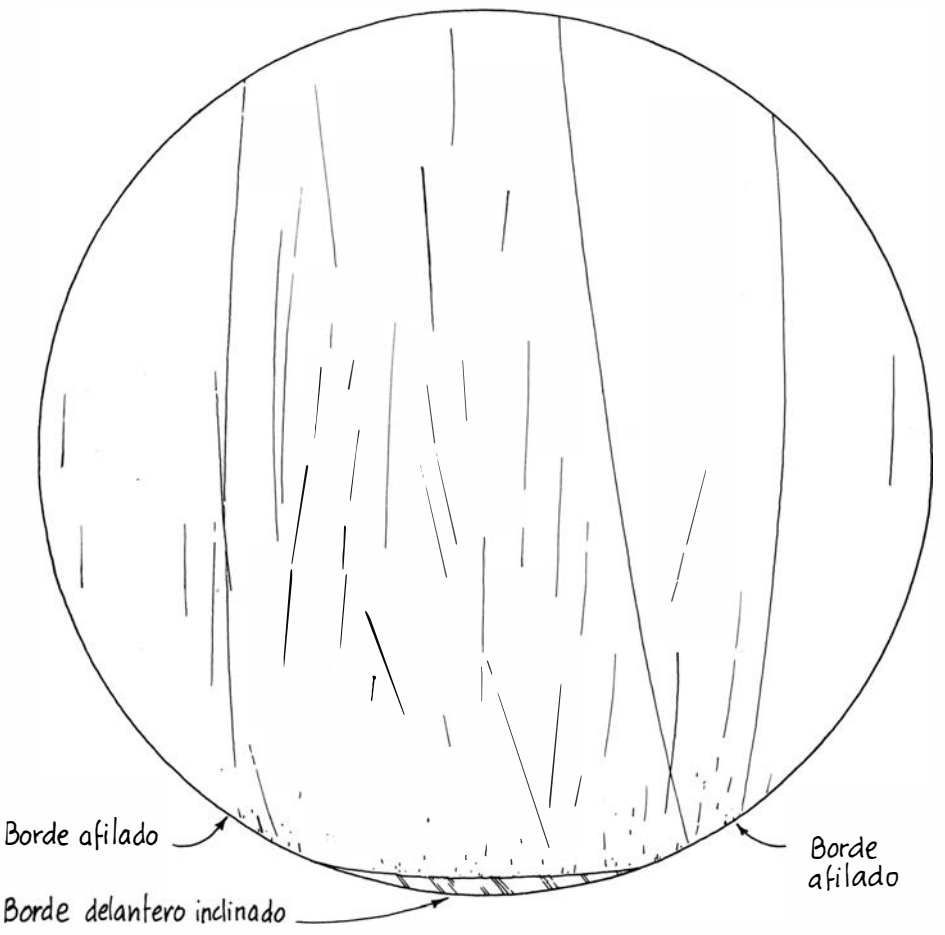
Distribución, por tamaños, de las partículas en una arenilla de un micrometro

una cuestión de suerte el que una de dichas partículas gire tomando una determinada orientación, en la que una de sus caras se clave y la otra raye. Un determinado grado de azar debe introducirse también en razón del movimiento aleatorio y la presión que se aplica al disco. Ocasionalmente, debí apoyarme más sobre un lado del disco, subiendo así la posibilidad de que se rayara más de ese lado.

Para probar el efecto del borde delantero sobre la frecuencia del rayado, Saccocio ideó varios experimentos con el disco de molibdeno encajado (excepto por la parte de superficie a pulir) en un material de plástico duro o resina. En el borde delantero había un anillo de plástico que rodeaba todo el perímetro de la superficie de molibdeno. El anillo tenía una inclinación de tres a cinco grados, situado de manera que su parte exterior estaba más lejos del cristal de base que la parte interior, que era la que se hallaba junto a la superficie del molibdeno. Saccocio hizo este pulido empleando suspensiones de arenilla de tamaño uniforme, y encontró que, con el borde delantero inclinado, la superficie de molibdeno se rayaba más que cuando otro disco de molibdeno (sin estar encajado en plástico) con el borde delantero afilado se restregaba sobre la misma suspensión de arenilla. De nuevo resultaba que era muy difícil aplicar la misma presión en los dos casos, lo cual nos podía conducir a resultados falsos. No obstante, Saccocio creyó que la diferencia en la frecuencia de rayado era de alguna manera debida a la forma del borde delantero. La inclinación de dicho borde aumentaba la posibilidad de que las partículas mayores responsables de la aparición de rayas se introdujeran en el espacio entre el disco y el plato de cristal.

Yo mismo repetí este experimento, pero añadiendo a una y a otra arenilla fina algunas partículas de 30 micrometros y encontré en general los mismos resultados. Tambien realicé los ensayos con un disco de molibdeno sin soporte de plástico, que tenía una parte de su borde inclinada intencionadamente mientras el resto del borde seguía estando afilado, restregando el disco en una sola dirección sobre la arenilla, primero con el borde delantero afilado y después, una vez inspeccionado, con el borde delantero inclinado. Aunque los resultados variaron, en general, estaba de acuerdo con los de Saccocio.

Advertí, asimismo, una curiosa forma de rayarse que a veces aparecía cuando el borde delantero estaba inclinado. Las rayaduras solían darse a los lados del borde inclinado más que directamente detrás de él. Si esta forma es realmente característica (se requerirán muchos ensayos para demostrar que ello es así) debe ser a causa de que el disco frota sobre una cresta central de partículas de gran tamaño rodando desde el borde inclinado y cruzando diametralmente hacia la parte de atrás. Por el borde inclinado entra una cantidad de partículas de gran tamaño mayor que por el borde afilado, y esta selección tiende a engrosar el centro del disco. Luego, debí empujar inadvertida y fortuitamente más sobre un lado que sobre otro provocando que el disco girara alrededor de la cresta central. Al haber en los lados menos partículas grandes que en la cresta central, el incremento de la presión sobre uno de los lados provoca más rayas en él que en la cresta central.



Tipo de rayas en un disco con el borde delantero ligeramente inclinado

Mucho más se podría hacer sobre estos experimentos. El lector podría obtener más datos sobre el sistema molibdeno/cristal, y también podría ensayar otros abrasivos (tanto en seco como en húmedo) y otros materiales pulidores tales como cristal (sobre cristal), aluminio, cobre, bronce y plomo. Los datos podrían interpretarse más fácilmente si se normalizara la presión aplicada sobre los objetos. Se puede ensayar colocando un peso conocido sobre el disco y restregando luego el disco a través de la suspensión al empujar horizontalmente el disco y el peso. Para un tamaño de arenilla dado, ¿hasta qué punto depende la frecuencia del rayado del peso aplicado? Puesto que el rayado es aleatorio, el lector necesitará muchos datos, estadísticamente bien interpretados, para responder a esa cuestión.

Cuando coloqué en un principio mi disco de molibdeno sobre la arenilla, había debajo de él partículas de todos los tamaños. Una vez que se ha pulido durante un rato, ¿siguen permaneciendo debajo del disco partículas de todos los tamaños o de alguna forma el proceso de pulido destruye las grandes partículas mientras que el borde afilado evita que entren las mayores en el espacio de debajo del objeto? ¿Por qué debía reponer la arenilla para evitar las rayaduras? Cuando pulía durante un rato con arenilla de 15 micrometros, el plato de cristal se volvía opaco al cubrirse con un polvo finísimo que, al parecer, hacía decrecer la frecuencia de los rayados. ¿Se obtenían esos mejores resultados porque entonces el disco se encontraba más próximo del cristal y, por tanto, las partículas grandes hallaban más dificultades para entrar en el espacio intermedio?

La chimenea doméstica es uno de los sistemas más comunes y antiguos para calentar las casas. El calor de la chi-

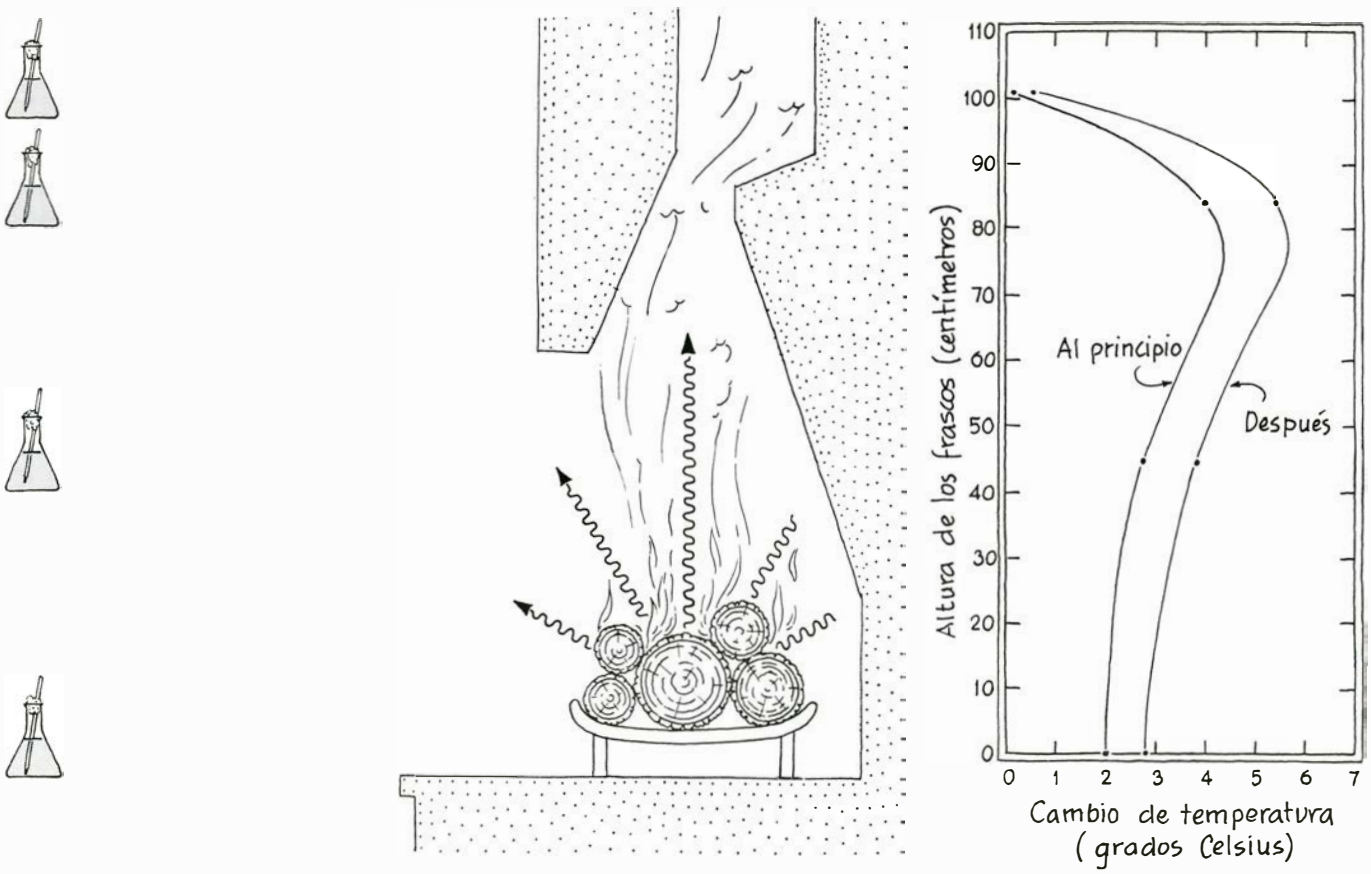
menea llega a la habitación, principalmente, por uno de los tres tipos de transferencia de calor existente: convección, conducción y radiación. Por convección es poca la cantidad de calor que llega a la habitación, ya que el aire caliente se pierde por la chimenea. Por conducción difícilmente podría entrar algún calor, ya que para ello sería necesario contacto directo, mediante objetos sólidos, entre el fuego del hogar y la habitación. Casi la totalidad del calor llega a la habitación por radiación, principalmente radiación en la zona del infrarrojo, viniendo la mayoría de esta radiación de las brasas calientes directamente, y no de las llamas, en contra de lo que podría creerse; esa es la razón por la que el fuego calienta realmente sólo después de haber quemado suficiente madera para formar las brasas.

La chimenea está considerada como una fuente ineficaz de calor, debido a que sólo una pequeña cantidad de la energía liberada por el fuego llega realmente a la habitación. Incluso parte de esta energía es a menudo desperdiciada por haberse puesto de moda colocar delante del fuego una pantalla de cristal para evitar que caigan chispas de la lumbre a la habitación. La pantalla casi nunca está diseñada para dejar pasar las radiaciones de la zona del infrarrojo.

La conservación de la energía tuvo que convertirse en un tema de interés general para que alguien se le ocurriera mejorar la eficacia de las chimeneas. Lawrence Cranberg, un físico de Austin, Texas, comenzó investigando la forma de colocar los leños en el hogar. Llegó a la conclusión de que la forma convencional de hacerlo (normalmente tres, formando secciones triangulares) no era demasiado buena, porque se manda hacia arriba la mayor parte de calor producido y, por tanto, se pierde al calentar los ladrillos de la propia chimenea o se escapa con los gases por la chimenea arriba. Cranberg llamó también la atención sobre el hecho de que las brasas, responsables de la mayor parte del calor radiado, no están bien encaradas hacia la habitación sino que se encuentran ocultas por leños sin quemar. Así, la gente, cuando quiere calentar suficientemente una habitación, de lo único de que se preocupa es de colocar los leños de forma que produzcan mucha llama, con lo cual sólo se consigue que se consuma de prisa.

Para evitar esta pésima forma de aprovechar las radiaciones, Cranberg diseñó un nuevo tipo de parrilla para chimeneas que mantiene los leños en una disposición en forma de línea ("Slot design"). Su idea era que si mantenemos el fuego dentro de un hueco, rodeado por troncos, el área expuesta de las brasas ardiendo podría incrementarse mucho, y el calor radiado podría emitirse por el hueco hacia dentro de la habitación (y no hacia la chimenea). Dado que el calor radiado podría producirse con una eficacia mayor, el combustible podría quemarse, por tanto, más lentamente, con menos llama viva y mejor exposición de las brasas hacia la habitación. El hueco podría incluso ser parcialmente autocontrolable, de manera que consiguiera mantener una distribución uniforme de la radiación, ya que si el hueco se ensanchase en algún punto, en ése el hueco radiaría más calor, y la temperatura local de la zona podría descender ligeramente. Con el tiempo, el resto del hueco podría ampliarse en el mismo grado.

Yo mismo ideé un experimento para comprobar cómo se distribuyen las radiaciones emitidas por la parrilla convencional, con los troncos amontonados sobre ella, y por el diseño de hueco. A falta de detector de infrarrojos, decidí comprobar la distribución del calor irradiado con una simplísima disposición de frascos llenos de agua con sendos termómetros en su interior. Coloqué enfrente de la chimenea cuatro frascos a diferentes alturas sobre el suelo, pero todos en la misma vertical. Los frascos eran del tipo Erlenmeyer, de 250 mililitros y contenían 200 mililitros de agua. Introduje un termómetro tipo Celsius en cada frasco y, para evitar las posibles pérdidas por evaporación, cerré la boca de cada frasco rellenando la abertura con material plástico de envolver alimentos. Parte de las radiaciones infrarrojas



Disposición de los frascos para medir la distribución de radiaciones, a partir de una parrilla convencional

emitidas por el fuego podrían ser absorbidas por el agua de los frascos, con lo que ésta se calentaría. Pude controlar la temperatura con los termómetros y tener así una idea aproximada de cómo se distribuía la radiación en el plano vertical a partir de un determinado fuego.

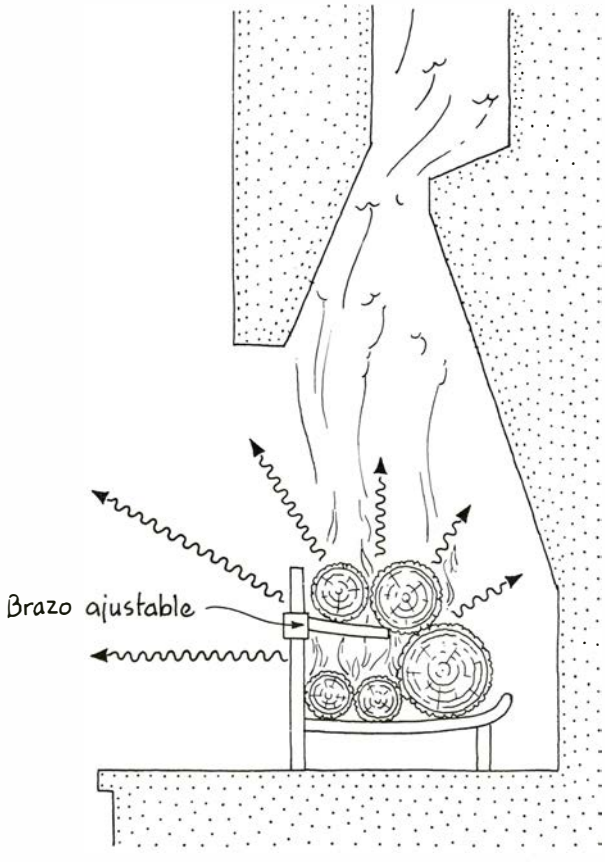
Uno de los inconvenientes de este método es que el calentamiento del agua va siempre con retraso respecto a cualquier incremento en la intensidad de las radiaciones del fuego. Pero me importaba menos ver cómo variaban las emisiones de radiación en función del tiempo, que estudiar cómo variaban en función de la altura. Es decir, supuse que la forma general de distribuirse las radiaciones por la habitación podría determinarse, de forma aproximada, controlando la temperatura del agua en los frascos.

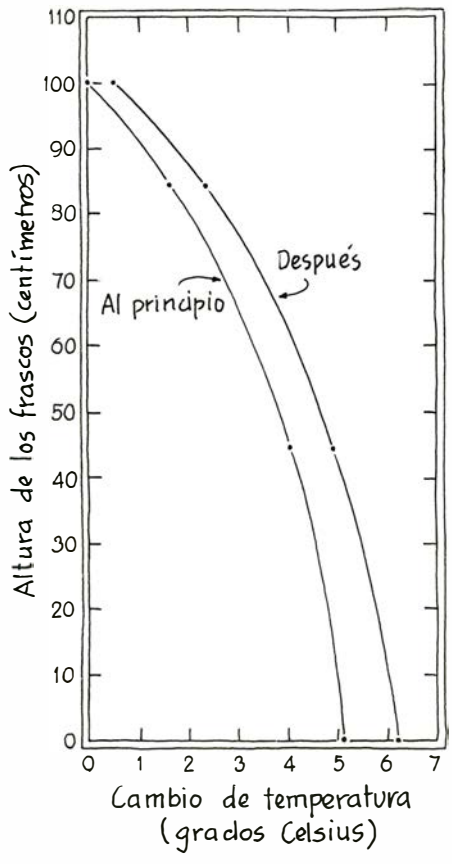
Procuré que, en los dos tipos de fuegos, se empleara el mismo tipo y tamaño de leño. Los tamaños los elegí siguiendo las recomendaciones que Cranberg me envió: debía haber un leño grande, de unos 15 centímetros de diámetro, en la parte posterior del hueco, uno o dos leños, de tamaño medio, en la parte de arriba, y dos más pequeños al fondo. Aunque mi madera era toda del mismo tipo, no sabía de qué clase era. A pesar de mi interés por conseguir que los tamaños de los troncos fueran iguales en los dos fuegos, esto sólo pude conseguirlo de forma aproximada, ya que los troncos distan mucho de ser piezas normalizadas, como los componentes de una máquina. Por lo demás, no pensaba que los resultados del experimento dependieran críticamente del tamaño de los troncos. Sin embargo, la cantidad de calor irradiada hacia la habitación por un fuego montado de acuerdo con el diseño de Cranberg sí podía aumentarse grandemente colocando un gran tronco en la parte de atrás de manera que el hueco formado fuera más ancho.

Puesto que sólo quería comprobar la forma en que se irradiaba el calor, decidí no controlar la temperatura ambiente de la habitación. Además, la temperatura del aire variaría verticalmente, ya que el aire caliente asciende; por otra parte, dicha temperatura dependería también de las dimensiones de la habitación y de su volumen, y por ello podría ser difícil tener un valor representativo. Así las cosas, decidí controlar la temperatura de los frascos, cada cinco o diez minutos, una vez que encendí el fuego. Durante el experimento dejé parcialmente abierta la puerta de la habitación, para que corriera una ligera brisa fría que ayudara a mantener constante la temperatura ambiente. Encendí los dos fuegos la misma tarde, con el fin de evitar que la posible variación de la temperatura de la calle influyera en el experimento al provocar un mayor o menor tiro a través del conducto de la chimenea. De todas maneras, a lo largo del experimento se produjo seguramente alguna variación en la temperatura exterior, ya que dicha temperatura va descendiendo progresivamente en el atardecer.

Comencé con la disposición convencional de los troncos, controlando la temperatura del agua durante una hora. Los cambios de temperatura más característicos se indican en el gráfico de la página opuesta. La cantidad de radiación tenía su intensidad máxima en el frasco que estaba situado a 84 centímetros del suelo, era casi cero en el frasco de arriba, situado a 101 centímetros y estaba por debajo del valor máximo en los otros dos frascos. Al parecer, el calor es radiado con intensidad hacia fuera, pero no demasiado horizontalmente. Evidentemente, el frasco de arriba recibe poca radiación debido, en parte, a que está en cierto modo tapado por la protección de la construcción de la chimenea, y también debido a que el área de la sección perpendicular que este frasco presenta al fuego es menor que la que presentan los otros frascos. La mayor parte del calor irradiado parece estar dirigido hacia arriba. Tal como Cranberg suponía, la mayor parte de dicho calor se perdía por los ladrillos que formaban la protección de la chimenea y por el propio conducto de humos.

Una vez hecho el experimento anterior, sustituí la parrilla convencional por el di-





Distribución de las radiaciones medidas a partir de una parrilla con diseño en forma de hueco

seño en forma de hueco, coloqué leños nuevos y encendí el fuego. Traté de que los troncos estuvieran en el montón uno pegado al otro con el fin de evitar agujeros o aberturas en la disposición en forma de hueco. El tipo de parrilla motivo de la patente es utilísimo para ello, ya que los brazos que soportan los troncos superiores son ajustables en altura, de manera que dicho tronco puede colocarse encima del tronco posterior. Los brazos ajustables también son útiles para controlar la velocidad de la combustión, ya que dicha velocidad se puede ajustar variando la altura del hueco. El consumo de leña era más lento con esta disposición y las llamas aparecían solamente en los troncos pequeños inferiores, uniformes a lo largo de toda la sección longitudinal del hueco, por lo que no era necesario girar ni remover los troncos. Los troncos de arriba se carbonizaban parcialmente por la parte que estaba mirando el hueco, y el que se apoyaba en el tronco trasero ardía vivamente con brasas rojas. El tronco trasero estaba totalmente al rojo por el lado del hueco. Se puede decir que se había conseguido una perfecta disposición, ya que poca era la cantidad de madera que se quemaba con inútiles llamas. Por el contrario, todo se quemaba carbonizándose, produciendo, por tanto, gran cantidad de radiaciones caloríficas.

De nuevo, y más o menos durante una hora, controlamos el calor irradiado. En esta ocasión, el perfil vertical de temperatura presentaba el máximo aproximadamente al nivel del suelo. Como Cranberg habia previsto, el hueco enviaba la radiación directamente hacia la habitación. Hacia arriba, en dirección del frasco superior, apenas sí se emitía radiaciones. Por ello, del total del calor irradiado, poco se perdía por los ladrillos de la mampostería de la chimenea y también poco se iba de la habitación por el conducto de humos.

La forma en que el calor se irradia a partir de este diseño en "hueco" se puede determinar fácilmente incluso con la mano. Puse la mano frente al fuego a la altura del suelo; la elevé directamente hasta una altura mayor que la de los troncos superiores. El calor que sentí en la primera posición era mucho mayor que en la segunda.

La concepción de Cranberg sobre cómo se irradiaba el calor desde su sistema de colocar y mantener los troncos era correcta. Es posible que alguien quiera experimentar variando la altura de los brazos, la altura del hueco y la longitud de los troncos. También podría medir la forma de radiación y la variación de su intensidad con el tiempo comparando dos tipos de hogueras de leños. ¿Producirá siempre el diseño tradicional menos radiaciones que el nuevo? ¿Cómo sería la producción de calor a partir de un fuego en hueco en función del tamaño del tronco posterior y de la altura del hueco? (Para llevar a cabo los experimentos con resultados válidos, debe tenerse presente que los troncos han de ser parejos y ha de seguirse siempre la misma técnica de encendido. Cranberg recomienda, si la madera está curada, encender el fuego con papel de periódico, y con ramas o arbustos, si la madera está todavía verde).

Se puede sustituir los leños de madera por troncos de papel prensado que se vende en el mercado. (Existen troncos similares de papel encerado que están ideados para quemarse por sí mismos.) ¿Podrá el lector conseguir un método de colocación de los troncos que supere la técnica de Cranberg? Mientras lo intenta también podría comprobar las propiedades de transmisión de calor que tienen las pantallas de cristal o metal que se colocan frente al fuego. La forma en que el calor se irradia no cambia demasiado por el hecho de poner la pantalla, aunque algo sí lo hace, pero lo que sí notará es que el agua de los frascos se calentará más lentamente.

En mi colaboración de febrero describí los cepillos de Haidinger (la figura en forma de reloj de arena que se puede ver al mirar hacia una luz linealmente polarizada), así como varios experimentos que se podían hacer con la figura y una lámina de un cuarto de onda fabricada en casa. Parte de la explicación de aquella serie de experimentos estaba basada en, o dependía de, la birrefringencia de la córnea, la cual atribuía a una preferencia en la orientación de las fibrillas de colágeno en dicha córnea. Frederick A. Bettelheim, de la Universidad de Adelphi, me ha corregido. De acuerdo con la investigación por él y sus colaboradores realizada, solamente el 25 por ciento de la birrefringencia de la córnea depende de una determinada orientación de las fibrillas, el otro 75 por ciento tiene su origen en el hecho de que estas fibrillas, largas y delgadas, no tienen el mismo índice de refracción que el material sobre el que se encuentran situadas. Las fibrillas de un mismo estrato son todas paralelas, pero su orientación varía de una forma casi aleatoria de un estrato a otro a lo largo de todo el espesor de la córnea. Como las fibrillas son birrefringentes contribuirían grandemente a la birrefringencia neta de la vista si estuvieran situadas paralelamente a lo largo del espesor de la córnea, pero el hecho de que estén situadas al azar hace que dicha contribución se vea muy disminuida.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA CENTRIFUGA DE GAS

TECHNICAL BASIS OF THE GAS CENTRIFUGE. Donald R. Olander en *Advances in Nuclear Science and Technology: vol. 6*, dirigido por Ernest J. Henley y Jeffery Lewins. Academic Press, Inc., 1972.

URANIUM ENRICHMENT BY GAS CENTRIFUGE. D. G. Avery y E. Davies. Mills & Boon Limited, Londres, 1973.

CENTRIFUGATION. Stelio Villani en *Isotope Separation*. American Nuclear Society, 1976.

VIENTOS ESTELARES

THE CIRCUMSTELLAR ENVELOPE OF ALPHA HERCULIS. Armin J. Deutsch en *The Astrophysical Journal*, vol. 123, nº 2, pág. 210; marzo, 1956.

THE SOLAR WIND. E. N. Parker en *Scientific American*, vol. 210, nº 4, págs. 66-76; abril, 1964.

THE FAR-ULTRAVIOLET SPECTRA OF SIX STARS IN ORION. Donald C. Morton en *The Astrophysicalk Journal*, vol. 147, nº 3, págs. 1017-1024; marzo 1967.

LOS HOMINIDOS DE TURKANA ORIENTAL

EARLIEST MAN AND ENVIRONMENTS IN THE LAKE RUDOLF BASIN: STRATIGRAPHY, PALEOECOLOGY AND EVOLUTION. Dirigido por Yves Coppens, F.C. Howard, Glynn Ll. Isaac y Richard E. F. Leakey. University of Chicago Press, 1976.

HUMAN ORIGINS: LOUIS LEAKEY AND THE EAST AFRICAN EVIDENCE. Dirigido por Glynn Ll. Isaac y Elizabeth R. McCown. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

KOOBI FORA RESEARCH PROJECT, vol. 1: THE FOSSIL HOMINIDS AND AN INTRODUCTION TO THEIR CONTEXT 1968-1974. Dirigido por Mary Leakey y Richard E. F. Leakey. Oxford University Press, 1978.

EL TOMATE

THE HISTORY OF THE USE OF THE TOMATO: AN ANNOTATED BIBLIOGRAPHY. G. A. McCue *Annals of the Missouri Botanical Garden*, vol. 39, págs. 289-348; 1952.

POTENCIAL GENETIC RESOURCES IN TOMATO SPECIES: CLUES FROM OBSERVATIONS IN NATIVE HABITATS. Charles M. Rick en *Genes, Enzymes, and Populations*, dirigido por Adrian M. Srb. Plenum Press, 1973.

VARIETAL INFLUENCE ON NUTRITIONAL VALUE. M.A. Stevens en *Nutritional Qualities of Fresh Fruits and Vegetables*, dirigido por Philip L. White. Futura Publishing Company, Inc., 1974.

THE TOMATO. Charles M. Rick en *Handbook of Genetics:* vol. 2, dirigido por Robert C. King. Plenum Press, 1975.

COLISIONES DE HADRONES A MUY ALTA ENERGIA

REGGEON FIELD THEORY: FORMULATION AND USE. H.D.I. Abarbanel, J.B. Bronzan, R.L. Sugar y A.R. White en *Physics Reports*, vol. 21, pág. 119, 1975.

REGGE THEORY AND HIGH ENERGY PHYSICS. P.D.B. Collins, Cambridge University Press, 1977

RECENT DEVELOPMENTS IN REGGEON FIELD THEORY. M. Moshe en *Physics Reports*, vol. 37, pág. 225, 1978.

EL TERMOSTATO DE LOS VERTEBRADOS

PROBING THE ROSTRAL BRAINSTEM OF ANESTHETIZED, UNANESTHETIZED, AND EXERCISING DOGS, AND OF HIBERNATING AND EUTHERMIC GROUND SQUIRRELS. Harold T. Hammel, H. Craig Heller y F. R. Sharp en *Federation Proceedings*, vol. 32, págs. 1588-1596; 1973.

THERMOREGULATION DURING SLEEP AND HIBERNATION. H. Craig Heller y S.F. Glozbach en *International Review of Physiology*, vol. 15, págs. 147-187; 1977.

SLEEP AND HIBERNATION: ELECTROPHYSICAL AND THERMOREGULATORY HOMOLOGIES. H. Craig Heller, J. M. Walker, G.L. Florant, S.F. Glotzbach y R. J. Berger en *Strategies in Cold: Natural Torpidity and Thermogenesis*, dirigido por Lawrence Wang and Jack W. Hudson. Academic Press, Inc., 1978.

EL PROBLEMA DE LAS TECTITAS

ON THE LUNAR ORIGIN OF TEKTITES. Dean R. Chapman y Howard K. Larson en *Journal of Geophysical Research*, vol. 68, n.º 14, pags. 4305-4358; 15 de julio de 1963.

THE CHEMISTRY, ORIGIN AND PETROGENETIC IMPLICATIONS OF LUNAR GRANITE AND MONOZONITE. M. J. Rutherford, P. C. Hess, F. J. Ryerson, H.W. Campbell y P. A. Dick en *Proceedings of the Lunar Science Conference, Seventh, 1976*. Pergamon Press, 1976.

TEKTITES AND THEIR ORIGIN. John A. O'Keefe. Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

ORGANISMOS QUE CAPTAN CORRIENTES

WIND-INDUCED VENTILATION OF THE BURROW OF THE PRAIRE DOG, *CYNOMYS LUDOVICIANUS*. Steven Vogel, Charles P. Ellington y Delbert L. Kilgore, Jr., en *Journal of Comparative Physiology*, vol. 85, n.º 1, págs. 1-14; 1973.

CURRENT-INDUCED FLOW THROUGH LIVING SPONGES IN NATURE. Steven Vogel en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 74, n.º 5, págs. 2069-2071; mayo 1977.

BRACHIOPOD ORIENTATION TO WATER MOVEMENT, 1: THEORY LABORATORY BEHAVIOR AND FIELD ORIENTATIONS. Michael C. LaBarbera en *Paleobiology*, vol. 3, n.º 3, págs. 270-287; verano, 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

SOME NOVEL MÖBIUS STRIPS. Charles Joseph Matthews en *Mathematics Teacher*, vol. 65, n.º 2, págs. 123-126; febrero, 1972.

THE THEORY OF BRAIDS AND THE ANALYSIS OF IMPOSSIBLE FIGURES. Thaddeus M. Cowan en *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 11, n.º 3, págs. 190-212; agosto, 1974.

ORGANIZING THE PROPERTIES OF IMPOSSIBLE FIGURES. Taddeus M. Cowan en *Perception*, vol. 6, n.º 1, págs. 41-56; 1977.

TALLER Y LABORATORIO

BASIC MECHANISM IN FREE ABRASIVE GRINDING. Edward J. Saccocio en *Applies Optics*, vol. 14, n.º 11, págs. A224-A227; noviembre, 1975.

Taller y laboratorio

Los colores brillantes de una pompa de jabón encierran toda una lección sobre la interferencia ondulatoria

Jearl Walker

Aunque la mayoría ha visto los colores que se dan en una finísima película de agua jabonosa, y algunos hasta los han estudiado en la clase de ciencias, son pocos los que han caído en la cuenta de las curiosas peculiaridades que esos colores encierran. Observemos una película de jabón sostenida verticalmente mediante un aro de alambre e iluminada con luz blanca. Veremos bandas horizontales coloreadas desde la parte superior hasta la inferior. Si la película ha tenido tiempo para asentarse hacia abajo, la parte de arriba quizás aparezca obscura. Esta ausencia de luz reflejada en la parte superior se debe a la extrema finura que la película tiene allí. Tal obscuridad suele exponerse en las aulas como ejemplo demostrativo de las propiedades de interferencia de ondas que presenta la luz.

¿Qué colores aparecerán por debajo de esta zona obscura y ultrafina? Después de haber enseñado durante varios años interferencia ondulatoria (pero sin haber examinado nunca atentamente una película de agua jabonosa), pensaba que la primera banda de color justo debajo de la zona obscura debería ser azul y que, a continuación y suavemente, los colores irían variando según el espectro visible: azul, verde, amarillo y rojo. Esta progresión se produciría debido a que el espesor de la película iría aumentando de arriba abajo, en razón de la influencia de la gravedad; la interferencia ondulatoria de la luz daría una luz reflejada de una longitud de onda que iría incrementando proporcionalmente con el espesor. Es decir, que iría variando desde las longitudes de onda más cortas, que corresponden al azul, hasta las mayores, las rojas. Una vez que la secuencia concluye, comienza a repetirse periódicamente conforme la película se va haciendo más gruesa. Normalmente cuando la película es muy grande, las bandas de colores en la zona del fondo llegan a ser casi indistinguibles, haciendo que en dicha zona la película se torne blanca a nuestros ojos.

A pesar de que este argumento parece completamente lógico, es erróneo en varios aspectos. Debajo mismo de la zona obscura no hay una banda azul, sino una banda blanca relativamente ancha. Este color blanco es una gran sorpresa; además, bajo la zona blanca, lo que hay es una banda amarillo-roja (naranja), seguida de otra púrpura. Solamente después de esta última aparece por fin una banda azul apreciable.

Por otra parte, la secuencia de los colores no es siempre la misma hacia la parte inferior de la película de jabón. Los colores que aparecen dependen de la clase de fuente de luz blanca que se emplee. Concretamente dependen de la temperatura que tenga la superficie de la fuente luminosa. Por ejemplo, una lámpara de tungsteno que ilumine a través de un proyector de diapositivas puede provocar la aparición de sólo una banda visible de azul, mientras que la luz solar directa (la cual tiene su origen en una superficie más caliente) da dos bandas azules visibles.

Primero explicaremos, desde un punto de vista teórico, por qué aparecen los colores sobre una película de agua jabonosa y hablaremos después sobre los colores que realmente se producen en una película de dicho tipo. La disertación sobre los colores reales seguirá muy de cerca un trabajo inédito de Benjamin Bayman y Bruce G. Eaton, de la Universidad de Minnesota. Otro trabajo en la misma línea ha sido publicado por Hiroshi Kubota, de la Universidad de Tokio. Por último, describiremos varias formas de producir películas de jabón que me fueron dadas personalmente por Albie Weiss, profesor de artes y oficios en Cleveland.

Si se ilumina con luz blanca una fina película de agua jabonosa, ¿por qué aparecen colores en la luz reflejada? Consideremos un rayo de luz monocromática (al que llamaremos *A*) que incide casi perpendicularmente sobre una finísima película de agua jabonosa. Una parte de esta luz (a la que llamaremos rayo *B*) es reflejada por la superficie. El resto de la luz del rayo *A* se refracta en la película, atraviesa el espesor de la misma y choca contra la segunda superficie de la película. Parte de la luz que llega hasta esa segunda superficie se refleja en ella y vuelve a atravesar el espesor de la película, refractándose al salir de la misma. Llamaremos *C* a este rayo emergente. Los rayos *B* y *C* retornan al observador, que se encuentra situado en el mismo lado con respecto a la película de jabón que la fuente luminosa. Estos dos rayos determinan que se vea la película brillante u obscura en el color particular que tenía la luz incidente al principio sobre la misma.

El resto de la luz incidente se refracta finalmente fuera de la película, aunque una parte de ella se refleja siempre hacia la zona del interior. Parte de esta luz emerge por la cara posterior de la película, sin mayores consecuencias; y otra parte emerge hacia el observador, si bien estos rayos desempeñan un papel exiguo en lo que ve el observador.

El hecho de que la película aparezca obscura o brillante depende fundamentalmente de las fases relativas en que se encuentren las ondas representadas por los rayos *B* y *C*. Por ejemplo, si las ondas están en fase exactamente, interferirán totalmente y en forma constructiva, y producirán luz brillante. Si están en completo desfase, la interferencia será absolutamente destructiva, y producirán obscuridad. Un caso intermedio dará un brillo de un valor asimismo intermedio.

La diferencia de fase entre las ondas que retornan se mide en longitudes de onda o en grados (360 grados corresponden a una longitud de onda completa). Resulta una interferencia totalmente constructiva cuando la diferencia de fases es cero o un número entero de longitudes de onda (o un número par o cero por 180 grados). Una interferencia totalmente destructiva se obtiene cuando la diferencia de fases es un número impar de semilongitudes de onda (o un número impar por 180 grados).

Puesto que los rayos *B* y *C* proceden del mismo rayo *A*, ¿por qué dichos rayos no iban a estar en fase y, consecuentemente, por qué no iban a producir una luz brillante reflejándose en la película? Pues por dos razones. En primer lugar, porque cuando la luz se refleja en una superficie puede variar su fase debido a la misma reflexión. Si la reflexión se produce sobre un material que tiene un mayor índice de refracción que el del medio en el que el rayo realmente se encuentra, la luz sufre un desfase de media longitud de onda (180 grados). Si la reflexión ocurre sobre un material con un índice de refracción menor no se produce cambio en la fase. Por ejemplo, la reflexión del rayo incidente *A* en la superficie frontal de la película (para producir el rayo *B*) provoca un desfase de

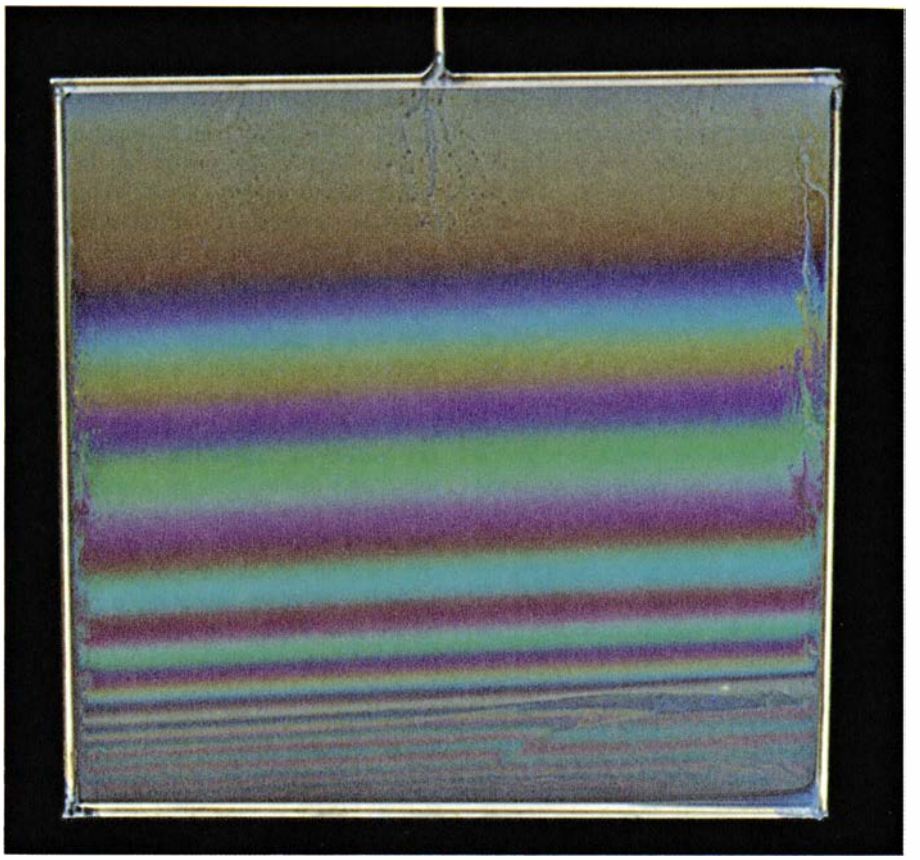
media longitud de onda, debido a que la película de agua jabonosa posee un índice de refracción mayor que el del aire; por lo mismo, pero aplicado en sentido inverso, la reflexión de *C* en la superficie posterior no provoca desfase alguno. Consecuentemente, las reflexiones en la superficie frontal y trasera originan una diferencia de fase de media longitud entre los dos rayos emergentes.

Se presenta una diferencia de fase adicional cuando el rayo *C* ha de atravesar por dos veces el espesor de la película y, por tanto, realiza un recorrido más largo que el *B*. Si *A* incide casi perpendicularmente sobre la superficie de la película, la nueva distancia a recorrer por el rayo *C* es aproximadamente el doble del espesor de dicha película. Supongamos que el espesor equivale a media longitud de onda. Cuando el rayo *C* cruce el espesor de la película por dos veces, emergerá después de haber recorrido una distancia igual a una longitud de onda completa, mientras que el rayo *B* sólo se reflejará en la superficie. (Para un cálculo minucioso, cuyo lugar no es éste, deberemos comparar el espesor de la película con la longitud de onda de la luz cuando está dentro de ella; dicha longitud de onda es la que tiene en el aire dividido por el índice de refracción de la película.)

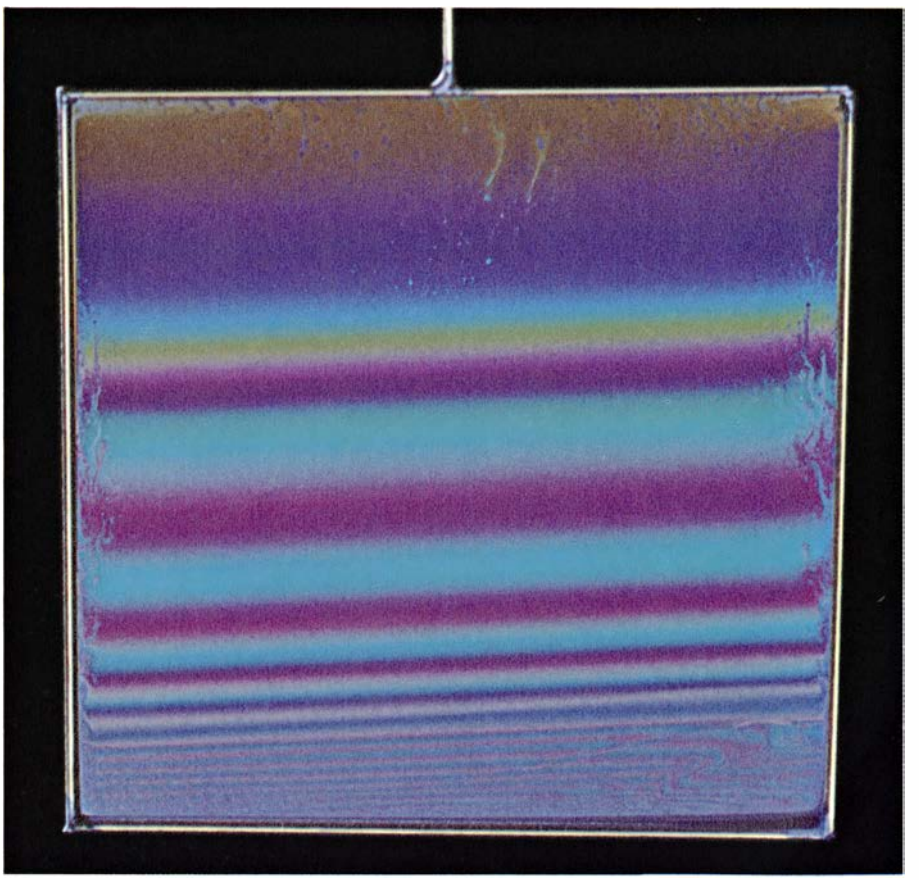
En suma, el rayo *B* sufre un desfase de media longitud de onda al reflejarse, mientras que el rayo *C* tiene un desfase cuyo valor depende del espesor de la película. El desfase del rayo *C* es del orden de una longitud de onda. Restando ambos desfases se obtiene el desfase existente entre los dos rayos al salir de la película. Si el espesor es tal que la diferencia de fases es un número impar de semilongitudes de onda, como en este ejemplo, los rayos se interferirán en forma destructiva, y la película se verá obscura. Si el espesor es tal que la diferencia de fase es cero o un número entero de longitudes de onda, los dos rayos emergentes estarán en fase y se sumarán para producir una luz brillante.

Para mayor simplificación hemos supuesto que el rayo *A* incide casi perpendicularmente en la película. El razonamiento anterior vale para cualquier ángulo de incidencia; lo único a modificar es que la nueva distancia a recorrer por el rayo *C*, al cruzar la película dos veces, sería mayor que dos veces el espesor de la misma.

Como hemos visto, cuando mantenemos una película de agua jabonosa encerrada en un aro de alambre, ella se va desplazando lentamente hacia la parte inferior, arrastrada por su propio peso; como consecuencia, el espesor incrementa de arriba abajo. Al iluminar con luz mo-



Película de jabón, iluminada por luz solar, reflejada en un papel blanco



Película de jabón, iluminada por luz de una lámpara de tungsteno, reflejada en un papel blanco

nocromática una película de agua jabonosa, se observa que en algunos sitios, a lo largo de la dimensión vertical de la película, el espesor parece ser justo el necesario para que los rayos reflejados se interfieran constructivamente, y se ven bandas horizontales brillantes del color de la luz empleada. Entre estas bandas brillantes, hay ciertos lugares donde el espesor es también el necesario para que se produzcan interferencias destructivas, y se ven entonces bandas horizontales obscuras. Entre las bandas brillantes y obscuras hay zonas de interferencia intermedia y, por tanto, de brillo también intermedio.

Esta argumentación básica tiene varios inconvenientes en los que uno no había caído hasta hace poco. Primero, ¿cómo puede darse una interferencia completamente destructiva entre los rayos *B* y *C*, si poseen distinta amplitud, pues el rayo *C* es menos intenso que el rayo *B*? Aun cuando se encuentren desfasados exactamente y la interferencia destructiva sea máxima, la anulación resultaría incompleta y aparecería alguna zona brillante.

La respuesta se halla en el resto de los rayos que salen en dirección al observador, una vez que han sufrido múltiples reflexiones dentro de la película. Hemos dicho que su papel no es importante por lo que respecta a lo que uno ve de la película, pero en esta ocasión nos son necesarios. Cuando la interferencia es destructiva todos los rayos extra están en fase con el rayo *C*, y todas sus amplitudes al sumarse a la del rayo *C* determinan que la amplitud resultante iguale a la del rayo *B*. Por tanto, los rayos extra, normalmente ignorados, pueden producir una banda obscura en la película.

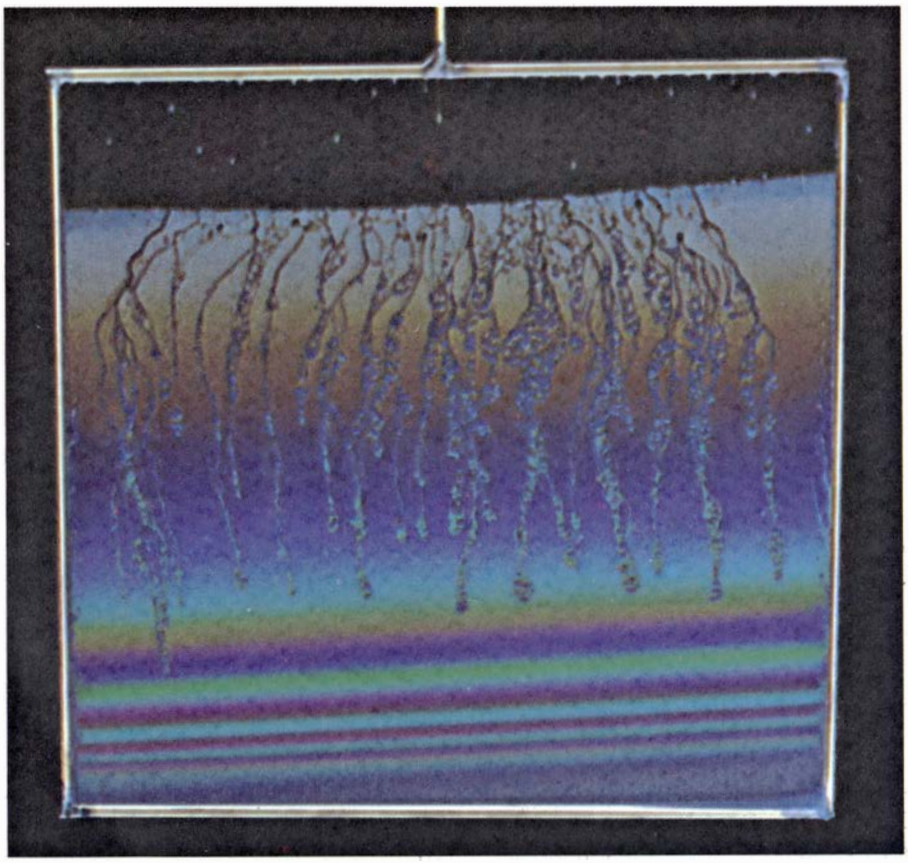
Otro problema es que, si la luz se origina en un lugar distante de la película, no aparecen conjuntos de bandas ni obscuras ni brillantes, en dicha película. Los rayos procedentes de una fuente luminosa, puntual y distante, llegan a la película paralelos unos a otros y con un solo ángulo de incidencia. En consecuencia, cuando retornan al observador, todos dejan la película con el mismo ángulo, el cual, de acuerdo con la ley básica de la reflexión, es igual al ángulo de incidencia. Dependiendo del espesor de la película, los rayos pueden interferirse unos con otros constructiva o destructivamente, pero todos en el mismo sentido y el observador verá una mancha brillante u obscura en el sitio donde la luz refleja hacia su ojo.

Con una fuente luminosa extensa, como el sol (que ocupa un ángulo de medio grado en el campo visual del observador), o con una lámpara cercana, los rayos luminosos inciden sobre la película en un rango de ángulos. Con la cabeza del observador interpuesta en una determinada zona puede interceptar algunos grupos de rayos *B* y *C*, en los cuales el rayo *C* sigue una trayectoria en la película que provoca una interferencia destructiva entre los dos rayos *B* y *C*, produciendo una banda obscura en la zona por donde los rayos emergen de la película de agua jabonosa. De la misma manera, el observador puede interceptar otro conjunto de rayos *B* y *C*, que den una interferencia constructiva; en consecuencia, en la zona por donde ellos salen, verá una banda brillante.

Un último inconveniente estriba en que los colores se pierden cuando la película se hace demasiado gruesa. La interferencia de colores se pierde no sólo cuando la película de agua jabonosa se hace más gruesa, sino también en otras películas típicas, como por ejemplo las de agua de lluvia en las aceras después de un chaparrón. Todos los argumentos anteriores sobre la interferencia ondulatoria siguen siendo válidos aun cuando la película sea varias veces más gruesa que la longitud de onda de la luz visible. Entonces, ¿por qué desaparecen los colores?

La respuesta es simple. Cuando el espectro visible atraviesa una película cuyo espesor es varias veces su longitud de onda, se ve sometido a una interferencia constructiva bastante completa. Cuando el observador ve la luz reflejada, en ella hay suficientes colores como para que dicho observador la vea como luz blanca. Conforme la película se va haciendo aún más gruesa, se desplazan los intervalos de longitud de onda correspondientes a la luz brillante, pero el observador sigue viendo blanca la composición de todos ellos.

Una curiosa característica de las películas verticales de agua jabonosa es la región obscura que se forma en la parte superior de la película y que lentamente se va extendiendo hacia abajo. Con un poco de suerte al asentarse hacia abajo, se puede conseguir que el espesor de la parte superior de la película sea mucho más pequeño que la longitud de onda de la luz. En esa zona, el rayo *C* sólo tiene que recorrer una breve distancia extra, casi despreciable, al atravesar la película; y así emerge de la película sin haber sufrido prácticamente ningún desfase. El rayo *B* sigue sufriendo un desfase de media longitud de onda por reflexión, pues este desfase no tiene nada que ver con el espesor. En consecuencia, en las zonas muy delgadas los rayos *B* y *C* emergen desfasados en aproximadamente media longitud de onda y, por tanto, su interferencia ha de ser destructiva. De ahí que una película muy delgada sea obscura.



Ausencia de luz reflejada en la parte alta de una película debido a que ésta es ultrafina en esa zona

Supongamos que se ilumine con luz blanca una película de agua jabonosa. El espesor necesario para que se dé una interferencia constructiva dependerá de la longitud de onda de la luz. Por tanto, los valores del espesor que dan origen a bandas brillantes diferirán ligeramente para cada color. Esta ligera diferencia es la que separa las bandas de diferentes colores en una película de agua jabonosa. Los colores deberán cambiar del azul al rojo (de las longitudes de onda pequeñas a las mayores) en dirección hacia abajo de la película conforme aumente el espesor. El hecho de que esta secuencia no se dé en las películas reales de agua jabonosa constituye un rasgo interesante del trabajo de Bayman y Eaton y de Kubota.

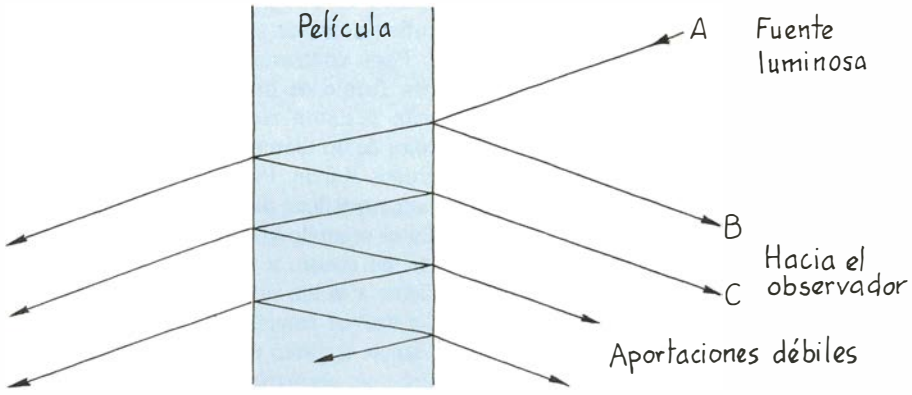
Para comprender los colores que observamos en una película de jabón hay que realizar una cuantificación cromática. Tal cuantificación es el sistema colorimétrico de la C. I. E. (Commission Internationale de l'Eclairage, que fue quien hizo el trabajo). Como resultado de dicho sistema las coordenadas de los colores obtenidas de varias maneras pueden plasmarse en un gráfico. Dos de dichos gráficos aparecen en las dos páginas siguientes. En ellos, los números décimales representan el sistema C. I. E. de coordenadas, los números asociados a los nombres de los colores indican las longitudes de onda de los colores, en nanómetros, y los números impresos en colores representan espesores de diversas películas de agua jabonosa, también en nanómetros.

El primer gráfico muestra los cálculos de Bayman y Eaton para los colores vistos en una película vertical de agua jabonosa iluminada con luz solar incidiendo sobre ella con un ángulo de 45 grados. El punto *a* corresponde a la parte superior, delgada, de la película en el lugar donde la luz reflejada empieza a ser perceptible. En una película de mayor espesor, el locus de las coordenadas cromáticas se mueve hacia fuera a partir del punto *a*. A lo largo de la curva resultante, la cual va dando vueltas por el interior del gráfico de cromaticidad, se puede ver los espesores de la película (en nanómetros).

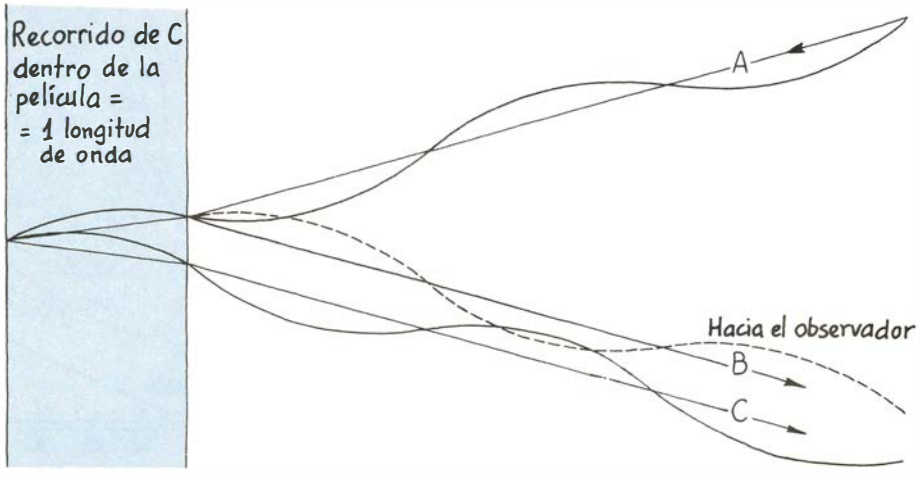
Aquí no se representa la parte superior ultrafina de una película de agua jabonosa en posición vertical porque los rayos reflejados por esa porción (a los cuales he llamado anteriormente rayos *B* y *C*) se anulan entre sí casi completamente debido a su interferencia destructiva. No hay modo de representar la obscuridad en el gráfico cromático. Con un espesor algo mayor, la película sigue pareciendo todavía obscura, pero tiene un tinte azul (porque la luz azul empieza a estar sujeta a una interferencia destructiva menos completa). Así pues, el primer punto representado en la curva con color, punto *a*, está desplazado del centro blanco del gráfico hacia el azul. La luz azul se halla sujeta a esta cancelación incompleta antes que los otros colores debido a que sus longitudes de onda son las más cortas del espectro visible. La cancelación incompleta empieza cuando la distancia extra que recorre el rayo que cruza la película dos veces (rayo *C*) se convierte, por lo menos, en una pequeña fracción de la longitud de onda de la luz. El rayo *C* comienza luego a estar ligeramente cambiado de fase, y no se encuentra exactamente desfasado con el rayo *B*. Este recorrido extra es aún bastante corto, pero constituye más una fracción de las longitudes de onda azules, más cortas, que de las longitudes de onda, más largas, del resto de los colores.

Si el espesor de la película sigue creciendo, entre 1/8 y 1/4 de una longitud de onda en el rango visible, todos los colores empiezan a estar sujetos a cierta interferencia constructiva. Por ello la curva de color se mueve a través del punto *b* en el centro blanco del gráfico. Cuando se examina una película vertical de agua jabonosa, esta región blanco es la primera banda fácilmente distinguible por debajo de la región obscura del extremo superior.

A medida que la película se va haciendo más gruesa, la curva de color se mueve hacia el punto *c* situado en la zona del amarillo-rojo (naranja), gira atravesando el punto *d* en una mezcla de azul y rojo (morado) y, por último, pasa a través del punto *e* en el primer azul puro de la película (algunos llaman al azul del extremo del espectro visible "violeta"). Después, la curva de color pasa casi por alto el verde, al moverse hacia el punto *f* cerca del centro blanco. En la película de agua jabonosa, el observador verá predominantemente amarilla la zona situada debajo de la primera banda azul. La curva gira después alrededor del centro blanco para dar bandas de color morado, azul (pero no tan puro como antes) y, por último, de un verde puro. Con una película de mayor espesor, el azul puro no vuelve a aparecer, pero se aprecia desviación más notable hacia el verde. Finalmente, la curva de color se dobla hacia abajo dentro del centro blanco, correspondiendo a un fondo



Caminos seguidos por un rayo de luz que incide en una película de agua jabonosa



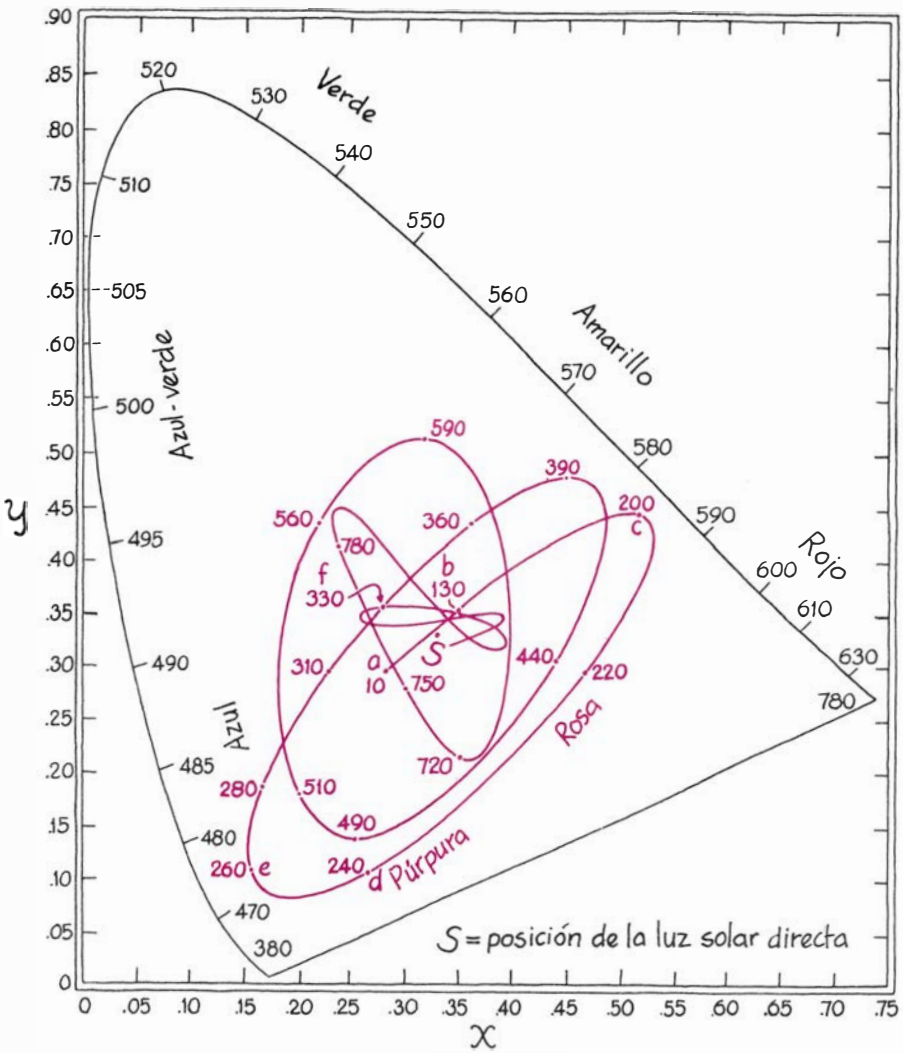
Ejemplo de interferencia destructiva

blanco en una película de agua jabonosa suficientemente grande.

Para contrastar estos resultados con una fuente de luz blanca más fría, Bayman y Eaton representaron la curva de color de un filamento de tungsteno a 3000 grados Kelvin. (Supusieron una temperatura superficial del sol de 5500 grados K.) En el segundo gráfico, el modelo es similar, en cuanto a su forma, al correspondiente a la luz solar, pero está desplazado del azul al amarillo y rojo. Como consecuencia el punto de arranque *a* no es azul, sino que permanece en el lado amarillo o rojo del blanco. Toda la curva muestra sólo una banda razonablemente pura de azul, junto con amarillos y rojos mucho más puros. El punto final está en el amarillo y rojo más que en el blanco. Este desplazamiento del esquema hacia el rojo es consecuente con la temperatura más baja de la superficie emisora porque con temperaturas inferiores la distribución de la radiación presenta un corrimiento hacia longitudes de onda más largas.

Bayman y Eaton sugirieron que las diferencias de color en las películas de agua jabonosa, iluminadas por diferentes fuentes de luz blanca, pueden hacerse más patentes cuando se proyectan las películas una junto a la otra en una pared para mejor comparar los colores. Bayman y Eaton estabilizaron sus películas de agua jabonosa en su alojamiento de cristal o de plástico lo suficientemente grande para que el cable pudiera sumergirse dentro de un recipiente de agua jabonosa situado en el fondo del alojamiento y, luego, orientarse verticalmente; emplearon una lente de gran diámetro con una longitud focal de unos 30 centímetros.

Quizá quiera el lector tratar de obtener una distribución de colores similar con otras fuentes de luz blanca de diferentes temperaturas superficiales y con otras soluciones de películas de agua jabonosa, como las que pasaré a describir. El cálculo de las curvas de color puede hacerse enojoso, pero ahora que ya dispone de dos modelos prototípicos juntos, las comparaciones entre un modelo prototípico y una película iluminada por una nueva fuente



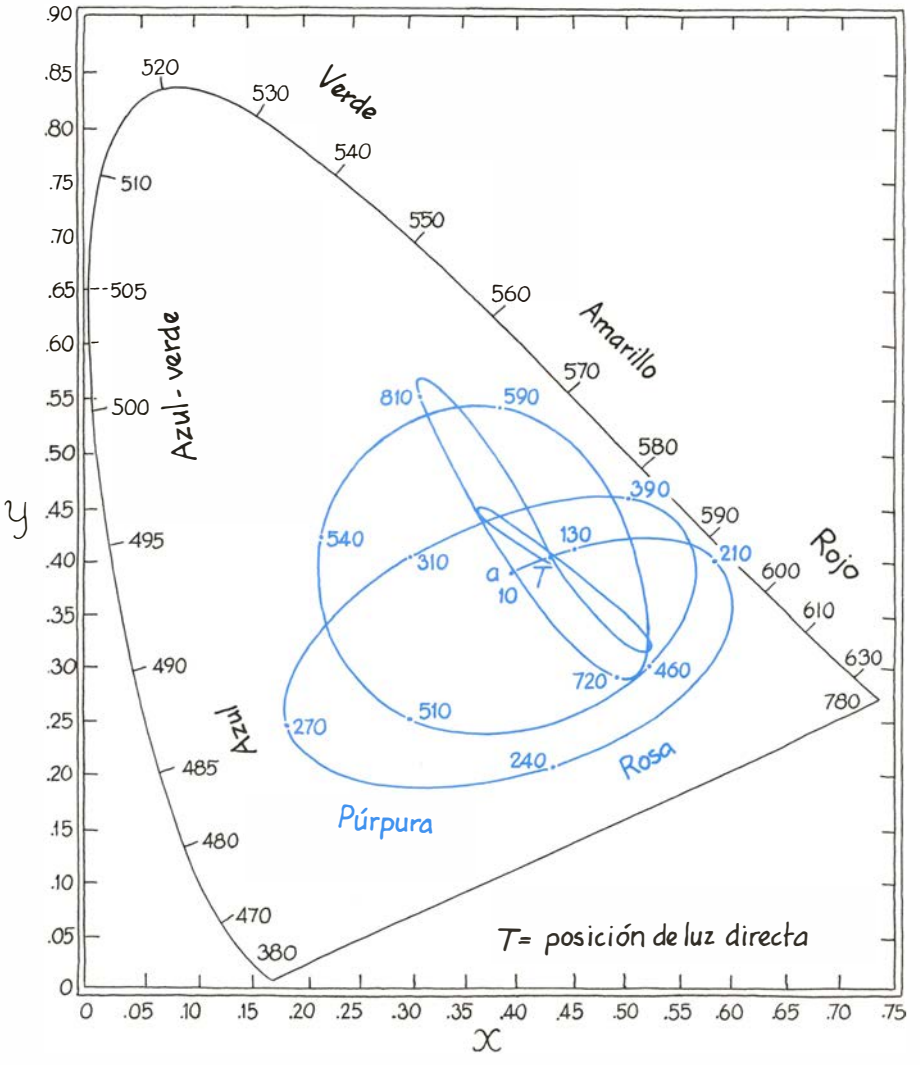
Representación de los colores de una película de agua jabonosa a la luz solar

de luz le ayudará a calibrar los colores de la nueva fuente.

De una u otra forma, los colores de las películas de agua jabonosa han sido estudiados por los científicos desde los tiempos de Newton, por lo menos; su trabajo sobre los colores de las películas jabonosas es especialmente interesante. En su *Optica* detalla cuidadosamente los colores que encontró en una película de agua jabonosa iluminada por luz solar. Allí se encontraban todas las sutiles características que he mencionado. Para Newton, la luz era de naturaleza corpuscular, no ondulatoria; de ahí que su trabajo constituya un ejemplo típico del uso de buenos datos de experimentación al servicio de una teoría equivocada. En su opinión, los colores resultaban de los diferentes grados de refracción de los distintos colores de la luz solar, como en su famosa demostración de la separación de los colores por un prisma de cristal. La demostración del prisma mostraba correctamente que la luz blanca se compone de todos los colores del espectro visible, siendo blanco el conjunto para el observador. Al parecer, Newton pensó que el espesor de la pompa de jabón separaba de alguna forma análoga los colores.

El modelo de Newton para la refracción nos resulta ahora un tanto extraño. Pensaba que las partículas de luz eran refractadas en un material como la película jabonosa porque este medio ejercía una fuerza en las partículas, aglutinándolas y reorientando después su dirección de movimiento. Creía que algunos colores se enviaban simultáneamente al observador, el cual interpretaría el color puro y su matiz de acuerdo con el color más intenso reflejado; pero su modelo no incluía la interferencia de las ondas. También advirtió las zonas negras e incluso el tinte azul pálido que rodea a las zonas más intensamente negras, pero interpretó esta ausencia de luz como la inexistencia de luz reflejada en esos puntos.

La causa del color de las películas de agua jabonosa se comprendió más tarde, cuando el modelo corpuscular de la luz de Newton perdió su valor entre el mundo científico. Sin embargo, pasarían aún bas-



Modelo cromático de una película de jabón a la luz de una lámpara de tungsteno

tantes años antes que se explicasen los pormenores de la región obscura. Si se examina una película vertical de agua jabonosa, se verá que la zona muy obscura no va aclarándose lentamente hasta que aparezca otra menos obscura con un tinte azulado, sino que se distingue nítidamente un límite entre ambas.

En 1939, Sir William Bragg explicó este límite basándose en la distribución molecular en la superficie de la película. A medida que una película de agua jabonosa se asienta y empieza a mostrar colores, muchas de las moléculas de hidrocarburos de cadena larga y finas del jabón se desplazan hacia la superficie de la película, colocándose cada molécula perpendicularmente a dicha superficie, con su parte rica en oxígeno hacia el centro de la película. Entre las dos superficies de estas moléculas de jabón orientadas hay otras moléculas de agua y de jabón, que no lo están. La película alcanza su delgadez máxima cuando se elimina la capa intermedia y las dos superficies de moléculas de jabón orientadas se acercan entre sí.

Una tal película extrafina, con un espesor de dos longitudes moleculares es muy obscura (por lo menos resulta difícil la percepción del azul). Bragg sugería que la transición de ultrafina al estado en que una capa jabonosa se extiende entre dos superficies no es gradual, principalmente porque a medida que la película se va haciendo más fina hasta convertirse en extrafina, durante su asentamiento, hay que presionar la capa intermedia de agua jabonosa para dejar sitio. Esta presión produce un abultamiento. Encima del abultamiento está la zona obscura ultrafina; debajo de éste se halla la película mucho más espesa (pero aún fina) mostrando el tono azul en la zona obscura.

Bragg llamó también la atención sobre una bonita demostración realizada por Sir James Dewar. Si se tiene acceso a un sistema de vacío, puede repetirse. Se deja una película vertical bajo una jarra en forma de campana mientras se evacúa el sistema; luego, se calienta la base de la jarra ligeramente de suerte que la parte baja del cable que sostiene la película se caliente también. El calor obliga a que parte del líquido suba por el cable hasta la región más alta de la película, donde el líquido forma gotas que se deslizan sobre la zona obscura. Cuando se iluminan las gotas, éstas parecen de plata sobre un fondo muy obscuro.

Aunque se puede comprar solución para formar burbujas en la mayoría de las tiendas de juguetes, no cuesta nada hacerla en casa. Sobre este asunto me ha informado Weiss, que da clases en una escuela superior de muchachos en Cleveland. La solución más simple es una mezcla de jabón corriente o detergente y agua limpia (la destilada es mejor). Para estabilizar las películas se puede añadir glicerina, de venta en droguerías y casas de suministros de productos químicos. Muchos detergentes llevan ya aditivos para estabilizar la espuma que forman al lavar. Si se mezcla el detergente (o jabón), agua y glicerina en una proporción de 1:3:3 aproximadamente, se podrá hacer una película que durará 45 minutos más o menos, protegiéndola de corrientes. Se pueden cambiar las proporciones para incrementar la duración de la película. La glicerina alarga la duración, pero también aumenta el tiempo de espera para conseguir una película vertical que se estabilice y muestre la zona obscura en la parte alta.

Weiss me enseñó recientemente una solución de trietanolamina y ácido oleico, con la que se podían hacer películas de larga vida y grandes burbujas. El mismo vende muestras de unos cien gramos de esta solución por 1,50 dólares. También proporciona, a cambio de otro dólar y medio, un protector y plataforma en donde formar burbujas y examinar los colores. Se le puede localizar en su casa: 24212 Elm Road, North Olmsted, Ohio 44070.

Los colores de las burbujas de Weiss son principalmente los rosas y los verdes, que se extienden en anchas bandas. El azul y el amarillo aparecen al soplar suavemente a través de una burbuja. Si movemos un trozo de algodón empapado de amoníaco cerca de una burbuja aparecen todos los colores del espectro en la proximidad del algodón, dando vueltas y construyendo figuras de corte psicodélico. El vapor del amoníaco altera la tensión superficial de la burbuja más próxima al algodón y la diferencia de tensión hace que la superficie circule (este es el efecto Marangoni que describí en agosto).

Weiss me mostró también una manera sencilla de formar una pompa de jabón sobre una plataforma. Se coloca una pequeña cantidad de fluido en la plataforma, mojando completamente la superficie. Se humedece luego un extremo de una pajita de las usadas para beber horchatas o granizados; el extremo mojado se mantendrá en el fluido de la plataforma y por el otro extremo se sopla con suavidad. Se va levantando poco a poco la pajita a medida que la burbuja crece, de suerte que se mantenga siempre el extremo inferior de la pajita dentro de la pared de la burbuja (la burbuja se romperá probablemente si toca la parte seca de la paja). He visto a Weiss hacer burbujas de casi 30 centímetros de diámetro.

Paul A. Smith, del Coe College, describió en *The Physics Teacher* (febrero de 1967) cómo hacer películas de gelatina y jabón de larga vida. Se mezclan 60 mililitros de agua fría con una cucharada de gelatina pura y se calienta la mezcla hasta unos 90 grados centígrados en un recipiente. Una vez disuelta la gelatina, y hayan desaparecido las burbujas, se añaden nueve mililitros de glicerina y otros tres de detergente líquido, removiendo lentamente. Mientras se están haciendo burbujas o películas con dicha solución se debe mantener ésta caliente.

Si se echa menos glicerina, las películas son fuertes y secas. Smith aconsejaba dejar secar las burbujas durante unos minutos antes de montarlas (él las montaba sobre cartulina corriente) o dejarlas "rodar por el suelo". Las películas pueden durar varios días o incluso años con la protección adecuada.

Los colores de interferencia en una película de agua jabonosa dependen, en parte, de que lo que más arriba he denominado rayo *C* no sufre cambio de fase, en virtud de su reflejo en la superficie posterior de la película. Supongamos que la superficie posterior no conste de aire, sino de otro material con un índice de refracción superior al del agua jabonosa. Entonces el rayo *C* estaría sujeto a un cambio de fase de media longitud de onda, lo mismo que el rayo *B* lo estuvo con relación a la superficie anterior. A raíz del cambio de fase extra se produce una modificación en los requisitos para los distintos efectos de interferencia; se presentará una interferencia constructiva cuando la distancia extra recorrida por el rayo *C* sea igual a cero o a un número entero de longitudes de onda; se producirá una interferencia destructiva cuando la distancia extra posea una medida aproximada de media longitud de onda. ¿Cambiarán los colores de la película? ¿Aparecerá una zona obscura en la parte alta? Sería interesante averiguarlo, pero colocar una película fina en una superficie sólida requeriría bastante trabajo.

Se puede intentar la formación de una burbuja de gelatina o de jabón sobre un portaobjetos de microscopio, colocando éste inmediatamente debajo de una superficie y trasladando después la burbuja para que choque con el portaobjetos. El cristal debe tener un índice de refracción mayor que el de la solución de la burbuja (es probable que lo tengan la mayoría de los cristales). No hay que dejar encoger demasiado la burbuja, porque quedaría una película falseada en el cristal. He tenido bastante éxito tomando la burbuja con el objeto en el cual monto la película, pero dejaré los detalles de los colores para el aficionado que quiera descubrirlos. Como referencia valen los resultados teóricos que Kubota ha representado sobre gráficos de cromaticidad. Se han publicado en un folleto que aparece reseñado en la sección bibliográfica de este mismo número.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA EVOLUCION

THE NATURE OF THE DARWINIAN REVOLUTION. Ernst Mayr en *Science,* vol. 176, n.º 4038, págs. 981-989; 2 de junio de 1972.

DARWIN AND NATURAL SELECTION. Ernst Mayr en *American Scientist,* vol. 65, n.º 3, págs. 321-327; mayo-junio, 1977.

MECANISMOS DE LA EVOLUCION

THE GENETIC BASIS OF EVOLUTIONARY CHANGE. Richard C. Lewontin. Columbia University Press, 1974.

DARWINIAN EVOLUTION IN THE GENEALOGY OF HAEMOGLOBIN. Morris Goodman, G. William Moore y Genji Matsuda en *Nature,* vol. 253, n.º 5493, págs. 603-608; 20 de febrero de 1975.

MOLECULAR EVOLUTION. Dirigido por Francisco J. Ayala. Sinauer Associates, Inc., 1976.

EVOLUTION. Theodosius Dobzhansky, Francisco J. Ayala, G. Ledyard Stebbins y James W. Valentine. W.H. Freeman and Company, 1977.

LA EVOLUCION QUIMICA Y EL ORIGEN DE LA VIDA

THE CHEMICAL ELEMENTS IN NATURE. Frank Henry Day. G. G. Harrap, 1963.

THE CHEMICAL ELEMENTS OF LIFE. Earl Frieden en *Scientific American,* vol. 227, n.º 1, págs. 52-60; julio, 1972.

CHEMISTRY, MATTER, AND THE UNIVERSE. Richard E. Dickerson e Irving Geis. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

LA EVOLUCION DE LAS CELULAS PRIMITIVAS

THE BIOLOGY OF BLUE-GREEN ALGAE. Dirigido por N. G. Carr y B. A. Whitton. University of California Press, 1973.

PRECAMBRIAN PALEOBIOLOGY: PROBLEMS AND PERSPECTIVES. J. William Schopf en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences: vol. 3,* dirigido por Fred A. Donath, Francis G. Stehli y George W. Wetherill. Annual Reviews Inc., 1975.

BIOSTRATIGRAPHIC USEFULNESS OF STROMATOLITIC PRECAMBRIAN MICROBIOTAS: A PRELIMINARY ANALYSIS. J. William Schopf en *Precambrian Research,* vol. 5. n.º 2, págs. 143-173; agosto, 1977.

LA EVOLUCION DE LAS PLANTAS Y LOS ANIMALES PLURICELULARES

PLATE TECTONICS AND THE HISTORY OF LIFE IN THE OCEANS. James W. Valentine y Eldridge M. Moores en *Scientific American,* vol. 230, n.º 4, págs. 80-89; abril, 1974.

THE EVOLVING CONTINENTS. Brian F. Windley. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

PRINCIPLES OF PALEONTOLOGY. David M. Raup y Steven M. Stanley, W. H. Freeman and Company, 1978.

POLIMORFISMO CROMOSOMICO Y EVOLUCION

GENETICAL STRUCTURE OF POPULATIONS. Kenneth Mather. Chapman and Hall, 1973.

DISTANCES BETWEEN POPULATIONS OF DROSOPHILA SUBOBSCURA BASED ON CHROMOSOME ARRANGEMENT FREQUENCIES. A Prevosti, J. Ocaña y G. Alonso, en *Theoretical and Applied Genetics,* vol. 45 págs. 231-241, 1975.

LA EVOLUCION DE LOS SISTEMAS ECOLOGICOS

COMMUNITIES AND ECOSYSTEMS. Robert H. Whittaker. The Macmillan Company, 1975.

ECOLOGY AND EVOLUTION OF COMMUNITIES. Dirigido por Martin L. Cody y Jared, M. Diamond. Harvard University Press, 1975.

THEORETICAL ECOLOGY: PRINCIPLES AND APLICATIONS. Dirigido por Robert M. May W. B. Saunders Company, 1976.

LA EVOLUCION DEL COMPORTAMIENTO

THE GENETICAL EVOLUTION OF SOCIAL BEHAVIOUR. W. D. Hamilton en *Journal of Theoretical Biology,* vol. 7, págs. 1-52; 1964.

THE SELFISH GENE. Richard Dawkins. Oxford University Press, 1976.

LA EVOLUCION DE LA ESPECIE HUMANA

EVOLUTION AT TWO LEVELS IN HUMANS AND CHIMPANZEES. Mary-Claire King y A.C. Wilson en *Science,* vol. 188, n.º 4184, págs. 107-116; 11 de abril de 1975.

HUMAN ORIGINS: LOUIS LEAKEY AND THE EAST AFRICAN EVIDENCE. Dirigido por Glynn Ll. Isaac y Elisabeth R. McCown. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

MOLECULAR ANTHROPOLOGY: EVOLVING INFORMATION MOLECULES IN THE THE ASCENTS OF THE PRIMATES. Dirigido por Morris Goodman y Richard E. Tashian. Plenum Press, 1976.

ORIGINS. Richard Leakey y Roger Lewin. E. P. Dutton & Co., 1977.

HUMAN EVOLUTION: BIOSOCIAL PERSPECTIVES. Dirigido por Sherwood L. Washburn y Elizabeth R. McCown. Benjamin/Cummings Publishing Company, 1978.

LA ADAPTACION

EVOLUTION IN CHANCING ENVIRONMENTS: SOME THEORETICAL EXPLORATIONS Richard Levins. Princeton University Press, 1968.

ADAPTATION AND DIVERSITY: NATURAL HISTORY AND THE MATHEMATICS OF EVOLUTION. E. G Leigh, Jr. Freeman, Cooper and Company, 1971.

JUEGOS MATEMATICOS

THE MAYBLOX PROBLEM. Margaret. A. Farrel en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 2, n.º 1, págs. 51-56; enero, 1969.

"EIGHT BLOCKS TO MADNESS" –A LOGICAL SOLUTION, Steven J. Kahan en *Mathematics Magzine,* vol. 45, n.º 2, págs. 57-65; marzo, 1972.

MORE PROGRESS TO MADNESS VIA "EIGHT BLOCKS." Andrew Sobczyk en *Mathematics Magazine,* vol. 47, n.º 3, págs. 115-124; mayo, 1974.

TALLER Y LABORATORIO

INTERFERENCE COLOR. Hiroshi Kubota en *Progress in Optics: vol. 1,* dirigido por E. Wolf. North-Holland Publishing Company, 1961.

SOAP FILM INTERFERENCE PROJECTION. John A. Davis en *The Physics Teacher,* vol. 12. n.º 3, págs. 177-178; marzo 1974.

Taller y laboratorio

Algunas "salas de los secretos" se distinguen por reflejar el sonido, pero hay otras más intrigantes

Jearl Walker

Las "salas de los secretos", que suelen ser estancias abovedadas, constituyen una atracción para sus visitantes en cualquier parte del mundo. La característica que las distingue de las demás salas es que en ellas cualquier sonido, aunque sea tan débil como un murmullo, recorre distancias muy superiores a las que dicho sonido recorrería sin la ayuda acústica que le presta la estructura de la estancia. De pronto, el oyente encuentra el efecto sorprendente, en particular cuando está viendo la distancia a que se halla la persona que está susurrando lo que él está oyendo, pareciéndole imposible que el susurro pueda recorrer dicha distancia.

El efecto acontece principalmente con dos tipos de estructuras. En el tipo más simple, la superficie interior de la habitación tiene la forma de sección de una esfera o de un elipsoide. Cuando alguien se pone a hablar en el centro de curvatura de la esfera, las ondas sonoras emitidas se reflejan y vuelven a concentrarse hacia el individuo que habla, con sorprendente sonoridad. Si se trata de un elipsoide y el sujeto se sitúa en uno de los focos mientras que el oyente se coloca en el otro, igual que antes la superficie curva refleja las ondas sonoras emitidas por el hablante, concentrándolas en el oyente, en esta ocasión situado en el segundo punto focal. En ambos tipos de estructura, un sonido puede cruzar un gran volumen de aire y seguir siendo audible debido a la reflexión simple y a la concentración en los focos.

El segundo tipo de "sala de los secretos" tiene también las paredes curvadas, pero su análisis implica una mayor dificultad, pues no exige la concentración del sonido en los focos. Cuando una persona emite un murmullo a lo largo de una de estas paredes circulares, el sonido se mantiene, de alguna manera, en una capa adyacente a la pared; se propaga a lo largo de la misma y puede ser oído por otra persona situada en cualquier punto de la circunferencia. Por qué permanece el sonido pegado a la pared y cómo puede el lector efectuar algunas demostraciones de este efecto son el tema de mi trabajo de este mes, aunque quiero dejar sentado, desde un principio, que no tengo claro todo lo referente a este tema.

La más famosa "sala de los secretos" de este segundo tipo está en la base de la cúpula de la catedral de St. Paul de Londres. La estancia es un corredor situado a unos 40 metros sobre el nivel del piso principal. Tiene una anchura de 1,8 metros y forma un círculo con un diámetro de 3,3 metros. La pared lateral a lo largo del corredor tiene una ligera inclinación hacia el centro. El corredor dista del vértice de la cúpula unos cuarenta metros.

Desde hace tiempo se sabía que si alguien murmuraba cualquier cosa a lo largo de la pared de la sala, dicho sonido podía oírse por otra persona que estuviese situada en cualquier punto de la circunferencia del corredor, siempre que se pegara a la pared. Por el contrario, si el bisbiseo se emitía hacia el oyente, pero siguiendo una dirección diametral, en el círculo de la estancia, las ondas sonoras se esparcían y el sonido se hacía inaudible para este último.

La anormal acústica de la sala llamó la atención científica, en primer lugar, de Sir John Herschel, reputado sabio que se le reconoce por sus contribuciones a la óptica y a la astronomía en la primera mitad del siglo XIX. Más tarde (en 1871), Sir George Airy, astrónomo real, explicó el efecto en términos de simple reflexión y concentración de las ondas sonoras por la cúpula. Sin embargo, en 1878, Lord Rayleigh estableció que tal explicación podría no ser correcta, ya que, para que así ocurriera, el oyente debería hallarse en el punto del corredor diametralmente opuesto al de la persona que hablaba. Puesto que el oyente podía situarse realmente en cualquier otro punto del pasillo circular, era inmediato que el efecto no se debía a las reflexiones de la bóveda.

La primera explicación de Rayleigh apareció en su *Theory of Sound* ("Teoría del sonido") (volumen II, sección 287, publicado en 1878). En ella expuso sus últimos trabajos sobre la difracción del sonido al salir de la boca de una persona. En general, cuando las ondas sonoras atraviesan una apertura de una anchura comparable a su longitud de onda, se interfieren una con otra y dan lugar a que el conjunto sufra una difracción. El sonido más intenso se encuentra en el centro; a partir del centro, y formando ángulo hacia fuera, se encuentran alternativamente regiones de interferencia destructiva (correspondiente a menos intensidad de sonido) y de interferencia constructiva (correspondiente a un sonido más intenso, aunque no tanto como en la región central). Acontece una difracción similar cuando las ondas sonoras pasan por un borde o se mueven alrededor de un objeto que tenga un tamaño equiparable al de su longitud de onda.

Cuando una persona habla, el sonido sale de su boca con una determinada configuración ondulatoria debido a que el sonido se difracta primeramente al cruzar la abertura de la boca y después se dirige hacia atrás, rodeando la cabeza. Es más difícil determinar dicha forma de lo que sería si el sonido saliera por una simple abertura de cualquier otra superficie sólida; por ello, y de momento, podemos simplificar la forma concentrándonos en el pico central de intensidad en un experimento ideal realizado con una simple apertura. La amplitud angular de la región central depende, en parte, de la longitud de onda del sonido; cuanto mayor sea esta longitud de onda (o lo que es lo mismo, más baja sea la frecuencia) tanto más ancha será la región central. Si un observador se pone a escuchar a una persona que esté emitiendo sonidos, principalmente de corta longitud de onda (esto es, de alta frecuencia), aunque se halle frente a ella es posible que no esté dentro de la zona central de las ondas difractadas. Pero si el sonido emitido está fundamentalmente en la zona de las longitudes de onda mayores, el observador oirá el sonido con nitidez aun cuando no se encontrara ante la persona que lo está emitiendo, ya que la difracción hace que la región central sea lo suficientemente ancha como para que se envíe una significativa cantidad de sonido hacia los lados del que habla e incluso hacia atrás del mismo.

Rayleigh estableció que, para que el corredor de la catedral de St. Paul se comportara como una "sala de los secretos", era necesario que las personas susurrasen a lo largo de la pared. Por ser los susurros sonidos de alta frecuencia, la mayoría emergen como un cono muy estrecho a lo largo de la pared. Por mor de simplificación consideremos que el cono sólo tenga dos dimensiones, en lugar de tres, y que se extienda en el plano horizontal (prescindiremos, por tanto, de la propagación vertical del sonido).

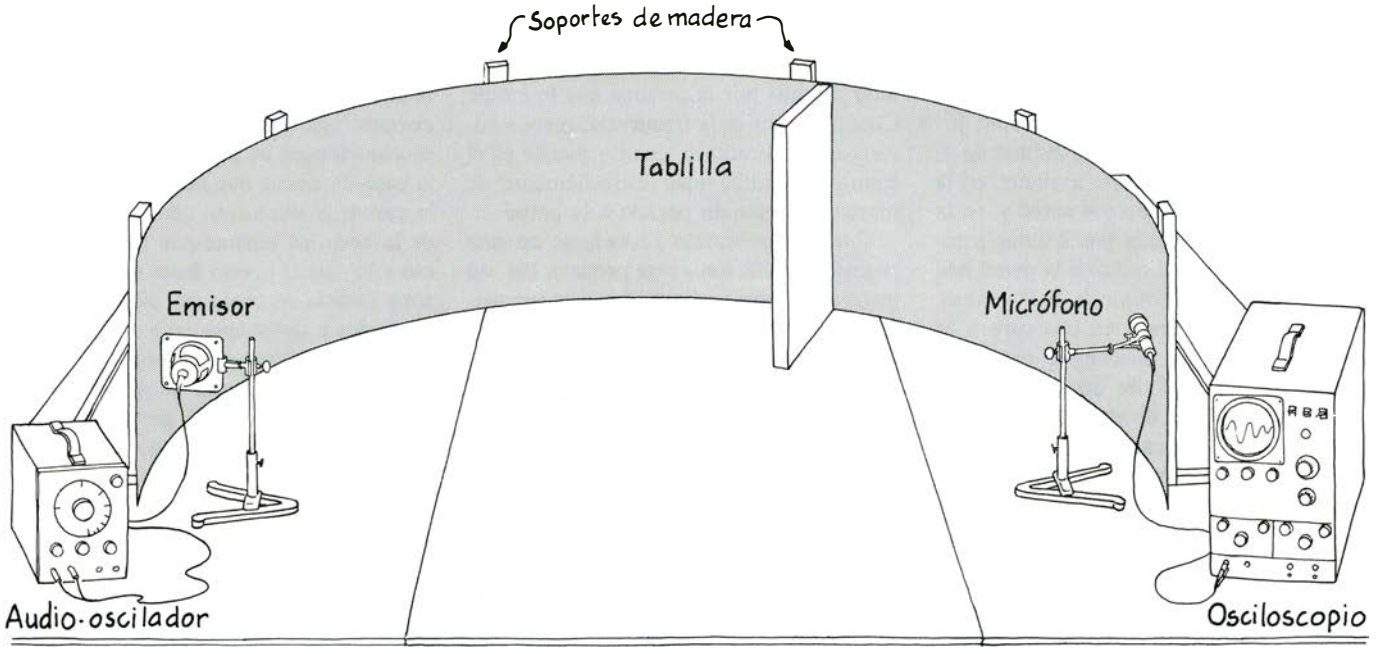
El sonido se separa de la pared formando un cono de rayos con un ángulo máximo θ con la tangente a dicha pared.

Los rayos se reflejan sobre la pared curvada en diversos puntos, de tal modo que en cada reflexión el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia. Como los rayos comienzan en un cono de ángulo θ, permanecen en una región limitada, en la parte exterior, por la propia pared y, en la parte interior, por una pared imaginaria con un radio igual al radio de la pared real multiplicado por el coseno de θ. Por tanto, los rayos se mantienen en una capa a lo largo de la pared y pueden ser oídos por cualquiera que se sitúe dentro de dicha zona, pero no fuera de ella. En este ejemplo el espesor de la capa está determinado por el radio de curvatura de la galería y por el ángulo máximo con el cual el sonido se separa de la pared cuando alguien susurra a lo largo de ella. Este ángulo viene determinado a su vez por la difracción del sonido causada por la persona que lo emite. Cuanto mayor es la frecuencia, menos notoria es la difracción; cuanto menor es el ángulo máximo, más estrechamente se mantiene el sonido pegado a la pared.

Cuando un sonido procedente de una pequeña fuente sonora se propaga por un plano en el espacio libre, decae su intensidad de un modo inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida. Sin embargo, con las reflexiones múltiples –en el modelo de Rayleigh para la galería de St. Paul– la intensidad disminuye proporcionalmente a tan sólo el inverso de la primera potencia de la distancia recorrida. Así pues, el sonido permanece con mayor vigor al recorrer la pared, que si se hubiera propagado siguiendo el diámetro de la circunferencia. Los sonidos de frecuencia más baja, presentes en la voz humana, no contribuyen de un modo significativo a la capa de ondas que permanece pegada a la pared; la difracción que sufren al salir de la boca las esparce por fuera de dicha estrecha capa, y esto hace que otra persona situada en cualquier punto de la circunferencia intercepte sólo una pequeña cantidad de la intensidad original. El modelo de Rayleigh gozó de gran prestigio debido a su simplicidad, pero como veremos más adelante dicha simplicidad puede conducir a errores.

En 1904, Rayleigh volvió sobre el efecto de la "sala de los secretos", traba-

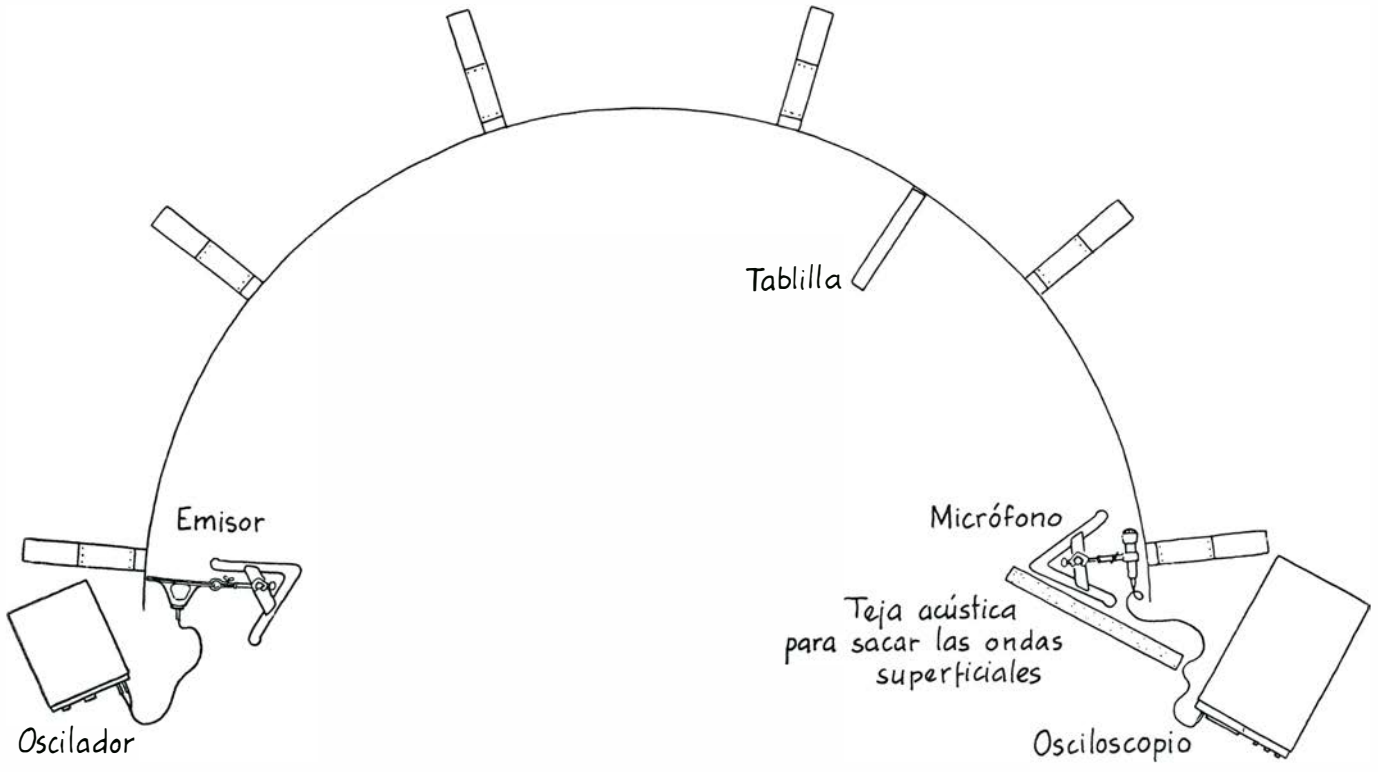
"Sala de los secretos" de la Catedral de St. Paul en Londres **(debajo de las ventanas superiores)**



Montaje de John S. Derov para comprobar el efecto de St. Paul

jando con un modelo de laboratorio consistente en una gran lámina de cinc (3,6 × 0,6 metros) doblada en forma de semicírculo. En el lado interior de uno de los extremos colocó un silbato, de los usados para reclamo de los pájaros, y en el otro extremo una vela que era sensible a las variaciones de presión producidas por el sonido. Al soplar, el silbato emitía un sonido de alta frecuencia con una longitud de onda de unos dos centímetros, provocando la oscilación de la vela, situada en el extremo opuesto. Pero cuando Rayleigh colocaba una tablilla estrecha (con una anchura de unos 5 centímetros) en cualquier sitio de la cara interior de la lámina de cinc, la vela no sufría ninguna perturbación imputable a los sonidos del silbato. Este resultado indicó a Rayleigh que las ondas sonoras se desplazaban a lo largo de la cara interior de la superficie curvada de la lámina de cinc en lugar de cruzar diametralmente el semicírculo. De forma semejante a lo que ocurría en la "sala de los secretos" de St. Paul, aquí también las ondas sonoras se desplazaban a lo largo de la pared.

A pesar del éxito de su modelo, Rayleigh no quedó satisfecho del todo. Y así, en 1910, publicó otro nuevo para explicar el efecto. En él estableció una correlación entre la oscilación del aire rodeado por la galería circular de la catedral de San Pablo y la oscilación de la membrana circular de un tambor. En un caso ideal, la membrana oscilaría con un tipo de onda con



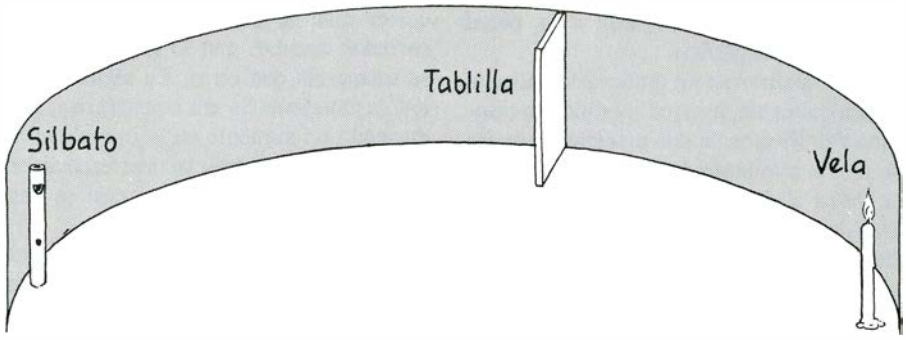
Vista en planta del montaje de Derov

amplitud nula a lo largo del borde (puesto que la membrana está sujeta en dicho lugar) y las amplitudes irían cambiando en dirección al centro de la membrana, de acuerdo con una ecuación en la que aparecen las funciones de Bessel, conocidas también como funciones cilíndricas (en razón del tipo de problemas que resuelven).

En una sala circular, una voz o cualquier otro ruido hace que las moléculas de aire oscilen, provocando, a su vez, la oscilación de la presión del aire. Estas oscilaciones de la presión del aire constituyen lo que nosotros llamamos sonido, porque hacen que nuestro tímpano vibre. Las moléculas próximas a la pared no pueden moverse (ya que encuentran la pared en su camino), pero las que están más lejos sí lo pueden hacer. Cuando estas moléculas más alejadas se mueven en dirección a la pared durante su oscilación, aprisionan a las moléculas más cercanas a la misma, aumentando la presión del aire. Cuando las moléculas más alejadas se mueven distanciándose de la pared, se separan de las moléculas que están más próximas a dicha pared, rebajando la densidad y, como consecuencia, disminuyendo la presión. Por eso las variaciones de presión en la capa próxima a la pared son relativamente grandes.

Para estudiar las características del movimiento de una membrana al vibrar en un tambor, la condición matemática que tiene que cumplirse es que, en el borde del tambor, la amplitud de las vibraciones sea nula. Al estudiar las variaciones de la presión del aire la condición a satisfacer es que, en la pared, las variaciones de la presión del aire alcancen un máximo. Para el oyente, eso significa que el sonido tendrá un máximo de intensidad en la pared. Conforme el oyente se vaya alejando de dicha pared, las variaciones de la presión y, por tanto, la intensidad del sonido irán disminuyendo de acuerdo con una función de Bessel, cuya variable sea la distancia del oyente al centro de la sala.

Para un tambor real y para una galería circular también real se pueden dar simultáneamente muchos modelos de éstos (correspondientes a las distintas funciones de Bessel resolutorias). Con el fin de simplificar, Rayleigh consideró que las oscilaciones en la galería se debían a una única función de Bessel de orden alto; este orden alto era necesario, pues las oscilaciones se daban sólo cerca de la pared y su intensidad se apagaba rápidamente al moverse hacia el centro del círculo. (Las funciones de Bessel de orden inferior producirían oscilaciones en zonas próximas al centro.) Tal excitación sólo se requería a lo largo de la pared, porque el individuo hablante susurraba cerca de la misma; consiguientemente, creaba una excitación mínima, sino nula, lejos de esa superficie.



Montaje experimental de Lord Rayleigh

Rayleigh estaba, por tanto, en condiciones de demostrar que las variaciones de presión provocadas por las ondas superficiales tenían su máximo en la pared y eran prácticamente nulas fuera de ellas. Además, estaba en condiciones de escribir una ecuación que diera la amplitud de la variación de la presión en función de la distancia al centro de la galería. Pero, una vez más, la simplificación de sus resultados puede inducir a error.

John S. Derov, estudiante de física en la Universidad estatal de Cleveland, diseñó una serie de experimentos sobre las ondas superficiales en una superficie curva similar a la de Rayleigh. Los resultados no pueden ser explicados de forma tan sencilla como los del autor inglés. Lo que significa que el lector tiene ante sí un sugestivo trabajo si es que el tema le interesa.

Derov fabricó una pared semicircular uniendo dos láminas de metal de 2,4 metros de largo por 60 centímetros de ancho con lo que obtuvo una sola pieza de 4,5 metros de longitud. La parte en que las láminas se solapaban la unió con remaches. El espesor del material de las láminas no era demasiado importante, con la salvedad de que, con un espesor mayor, la estructura sería más robusta. Para conseguir que la lámina completa se mantuviera formando un semicírculo encima de una mesa lo suficientemente grande, Derov colocó ocho soportes de madera por detrás de la lámina separados entre sí unos 60 centímetros. Para aumentar la masa y la rigidez de la pared, pegó a la cara exterior de la misma láminas de cemento e incluso grandes trozos de Play–Doh.

Las reflexiones que se podían dar en las paredes de la habitación, y hasta en los objetos que en ella hay, pueden complicar no poco el comportamiento del sonido. Para obviarlo, Derov suspendió unas mantas formando una tienda de campaña por encima y enfrente del semicírculo. Además, sustituyó el silbato y la vela de Rayleigh por otros elementos. En un conjunto de ensayos usó un altavoz de 51 milímetros como fuente de sonido y un micrófono como detector. En otra tanda trabajó con dos osciladores piezoeléctricos de 76 milímetros; uno lo usaba como fuente y otro como detector. También, aunque brevemente, ensayó con un par de pequeños auriculares del tipo de los que se venden con algunos televisores, pero su rango de frecuencias era bastante estrecho. En todos los casos, la fuente sonora emitía una onda sinusoidal procedente de un audiooscilador con un controlador de volumen y frecuencia; la señal procedente del detector se leía en un osciloscopio.

Existe una gran variedad de equipos válidos para su empleo en estos experimentos. Lo primero que se necesita es una fuente emisora capaz de emitir frecuencias en un rango que varíe desde un kilohertz hasta 25 kilohertzs, aproximadamente. El detector no necesita tener más que un medidor de volumen como el que hay en algunos magnetofones. Se debe evitar el uso de grandes objetos en el montaje del experimento, ya que las reflexiones de las ondas sonoras sobre tales objetos pueden complicar los datos. Los transductores piezoeléctricos se venden normalmente en las tiendas de suministros de equipos electrónicos y de radio, así como los altavoces de alta frecuencia para los sistemas estéreos; el costo normal de cada uno de ellos es de unos 8 dólares para un rango de frecuencias de 7 a 25 kilohertzs.

Para cada conjunto de experimentos, Derov situaba tanto la fuente emisora como el detector a la misma altura (aproximadamente hacia la mitad de la pared). El emisor lo colocaba paralelo a la pared y el detector de igual manera, pero mirando hacia el extremo en donde estaba situado el emisor; de vez en cuando, reorientaba el detector para comprobar si el sonido se propagaba directamente a través del semicírculo. Como Rayleigh, Derov colocaba el emisor y el detector cada uno en un extremo, y, siguiendo sus pasos, encontró que el sonido era más intenso en la capa inmediata a la pared. Observó también que el sonido se eliminaba fácilmente colocando una tablilla estrecha en cualquier punto de la semicircunferencia, entre el emisor y el detector. Según parece, Rayleigh y Derov hallaron que las ondas so-

noras se propagan pegadas a la pared curva de la superficie.

Para analizar de un modo sistemático el sonido cerca de la pared modificó la posición del detector de dos maneras: primero lo movió a lo largo de la circunferencia de la pared al objeto de comprobar si la intensidad tenía allí su máximo y también desplazó el detector radialmente en diversos puntos de la circunferencia para comprobar si el máximo de intensidad decrecía conforme se iba acercando al centro de curvatura. Aparece una nueva dificultad con los resultados obtenidos al mover el detector de la primera forma, es decir, a lo largo del perímetro de la circunferencia. Derov halló inmediatamente que la intensidad a lo largo de dicho perímetro variaba mucho, alternando los altos valores de intensidad esperados con puntos casi silenciosos.

Similares variaciones a lo largo de la circunferencia habían sido observadas por C. V. Roman y G. A. Sutherland, en 1921, en la "sala de los secretos" de St. Paul. Colocaron un emisor continuo de frecuencia única cerca de la pared de la galería y comprobaron el nivel de sonido en diversos puntos a lo largo del corredor. En unos había un nivel de sonido acorde con lo esperado, pero en otros apenas se oía nada. Ellos atribuyeron estas variaciones a las interferencias de las ondas al recorrer más de una vez el perímetro del corredor circular, con lo que unas ondas se solaparían con otras. En algunos puntos, la interferencia era constructiva, produciendo un aumento en la intensidad del sonido; pero en otros la interferencia era destructiva, y allí el sonido casi se anulaba.

Algo parecido debería haber ocurrido en el montaje de Derov, aunque allí las ondas no dieran más de una vuelta al círculo, pues lo que el joven físico montó fue un semicírculo. Una explicación presumible podría ser que algunas ondas llegasen a la pared opuesta al emisor reflejadas por el aparato, por las mantas de la tienda o incluso por el propio cuerpo de Derov y, desde allí, se propagasen en sentido inverso por la pared interfiriendo con las demás ondas.

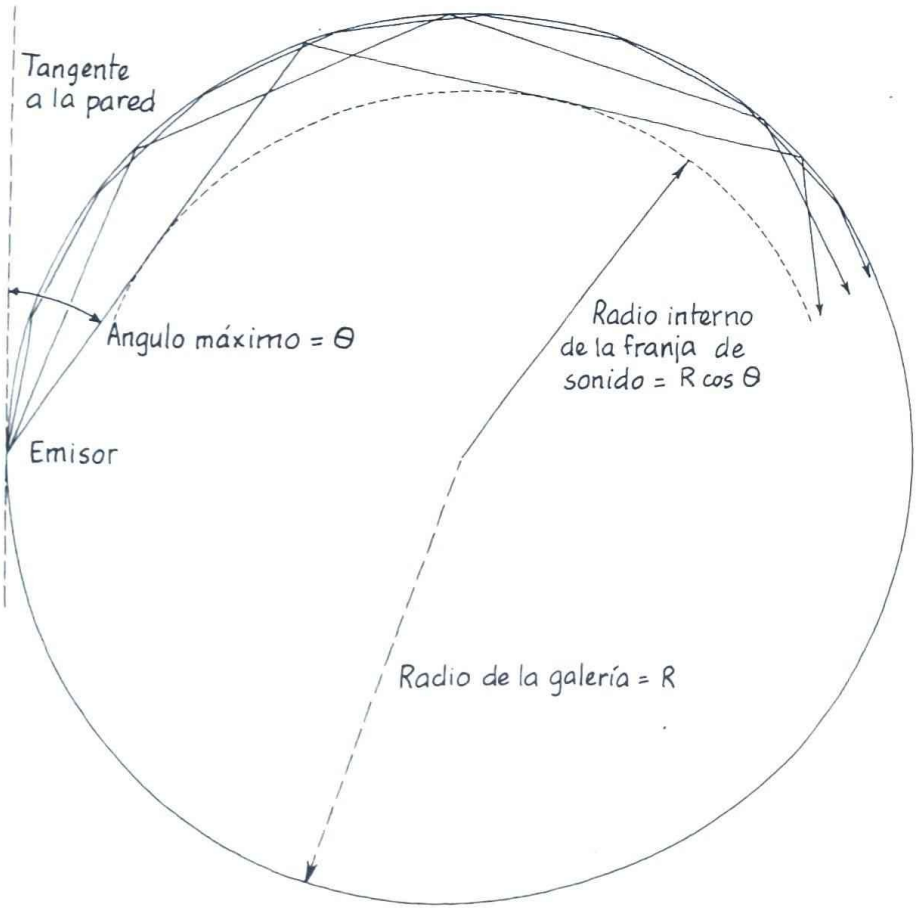
Para comprobar esta posibilidad, Derov colocó una gran loseta acústica (quitada del techo) en el extremo de la pared orientándola de forma que la ayudase a reflejar todas las ondas fuera del montaje. Descubrió que las zonas casi silenciosas se eliminaban, si no totalmente, sí en elevada proporción, consiguiéndose un nivel más o menos constante de volumen a todo lo largo de la pared. Si el lector quisiera continuar estos experimentos, un tema sería dedicarse a mejorar las condiciones del montaje para una mejor eliminación de las ondas que se reflejan y retornan a lo largo de la pared.

Se nos hace más difícil y explicar las medidas del sonido tomadas por Derov a lo largo de una línea radial. Esperábamos hallar que, una vez eliminadas las molestas ondas reflejadas al desplazar el detector en una dirección perpendicular a la pared, dicho detector nos indicaría un pico máximo y único de intensidad en la pared y prácticamente una intensidad nula a poca distancia de ella. Por contra, siempre hemos detectado, por lo menos, dos máximos: el mayor, en la pared, como era de esperar, y otro o dos más alejados de ella.

Al principio no comprendíamos la aparición de estos picos extras, pero pensándolo mejor nos dimos cuenta de que debíamos haber contado con ellos por dos razones: primera, el sonido de la fuente emisora no salía en un cono estrecho corriendo a lo largo de la pared sino que se difractaba al salir de la fuente y se propagaba. Como consecuencia, era excitada más de una de las funciones de Bessel, solución de las mencionadas por Rayleigh, creando un modelo neto que tenía un gran pico de función de Bessel en la pared, y otros picos, también de función de Bessel, fuera de ella. Derov estaba midiendo el modelo compuesto, más complicado. Segunda, las reflexiones del sonido emergente en el tablero de la mesa, el instrumento e incluso las mantas eran inevitables, y complicarían los datos creando modelos de interferencia cuyos picos parecía estar observando Derov.

Esperábamos reducir la difracción de la fuente emisora por medio de frecuencias más altas y, así, reducir la distancia de la pared a la cual aparecían los múltiples picos. Los datos de Derov pueden haber confirmado esta esperanza en cierto modo, pero la dispersión en los puntos en que se realizaron las mediciones fue demasiado grande para que el argumento convenciera. Si Derov hubiera podido llegar a frecuencias aún más altas (longitudes de onda más cortas) con su aparato, probablemente habría podido conseguir una única capa de sonido a lo largo de la pared, como hizo Rayleigh. No obstante, la suposición de una simple capa de sonido no es demasiado buena ni siquiera en la "sala de los secretos" de St. Paul. Raman y Sutherland encontraron también múltiples capas de sonido allí, a medida que iban moviendo su detector mientras se alejaban radialmente de la pared.

Podría sacársele mucho partido a este experimento. En primer lugar, se podría mejorar el diseño eliminando bastantes sonidos reflejados. Así, en vez de colocar la pared en una tarima, se puede poner sobre gomaespuma para absorber el sonido. Para eliminar completamente cualquier señal reflejada supongo que se podría col-



Modelo de rayo de Rayleigh para el efecto de la "sala de los secretos"

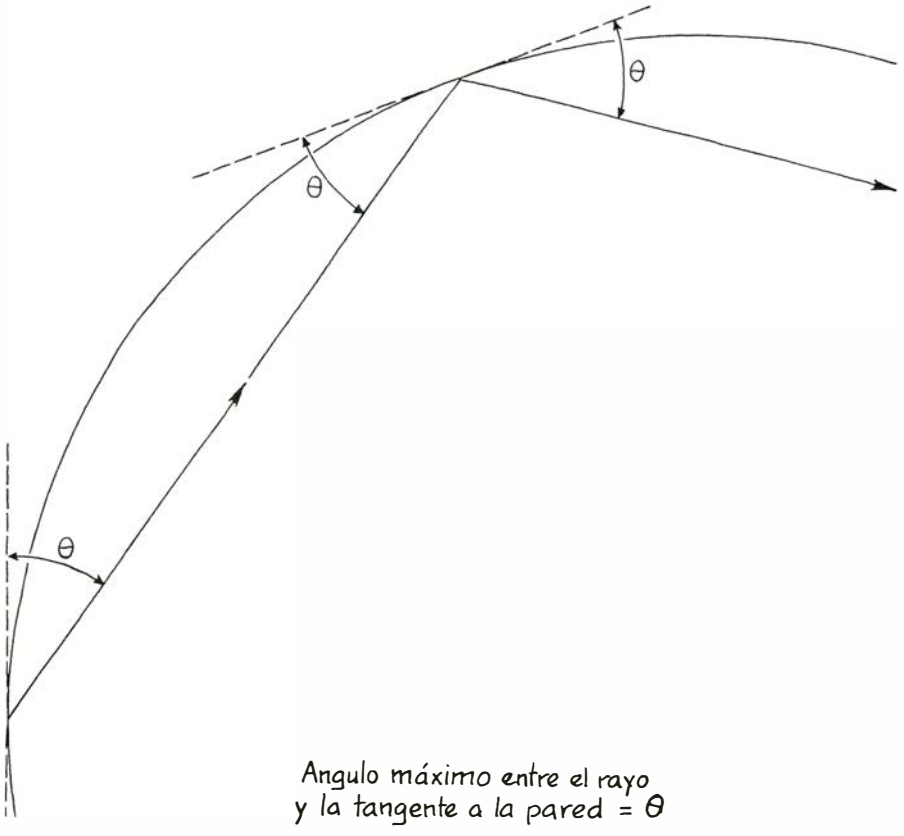
gar el semicírculo en el exterior, con la concavidad hacia arriba, en un amplio espacio abierto. También se podría construir un semicírculo mayor o usar una estructura arquitectónica existente que tenga un radio de curvatura grande. Si no se consigue una estructura mayor, habría que alcanzar frecuencias más altas, de suerte que las longitudes de onda sean mucho más cortas que el radio de curvatura.

Además de tomar datos como los de Derov, quizás interese saber cómo cambia la intensidad de las ondas de la superficie con la altura a lo largo de la pared, y cómo cambia de intensidad el modelo si la fuente emisora y el detector no se hallan a la mitad de la altura de la pared. Una característica notable de la galería de St. Paul es que la pared está ligeramente inclinada hacia dentro. Algunos investigadores han sugerido que esta inclinación ayuda a mantener las ondas de superficie. Si uno mismo construye una pared con una ligera inclinación podría confirmar esta hipótesis. Se supone que el efecto de las "salas de los secretos" también funciona con estructuras no rígidas (aunque el modelo matemático es más complicado) y por ello se podría realizar el experimento con paredes finas para hacer comparaciones.

Si quien realiza este experimento es un aficionado a la electrónica, quizá pretenda medir la velocidad de las ondas superficiales en un sistema normal. Se mueven algo más lentamente que el sonido en una línea recta; sería muy interesante comprobar la diferencia de velocidad existente entre ambos. Esto se podría medir usando un oscilador que emitiera un pulso de sonido corto (se debe hace lo más próximo que se pueda a una frecuencia única) y también pusiera en marcha un osciloscopio. Conéctese el detector al osciloscopio. El tiempo necesario para que la vibración llegue al detector comienza cuando se inicia la señal en el osciloscopio y termina cuando empieza el modelo de oscilación.

Si el aficionado tuviera la oportunidad de viajar a Londres, debería visitar la "sala de los secretos" de la catedral de St. Paul. Cuando yo la visité, aunque ya sabía lo que iba a observar, quedé maravillado de sus sorprendentes condiciones acústicas. Una amiga mía se puso en el extremo opuesto del corredor y empezó a hablar de cara a la pared. Pude oír sus susurros y conversación normal, a pesar del gran ruido que hacían los turistas tanto en el corredor como, más abajo, en los bancos. (Es mejor visitar la galería en invierno, cuando hay menos turistas.)

El efecto parecía más pronunciado cuando mi amiga y yo permanecimos próximos a la pared, pero en una conversación normal el efecto subsistía cuando uno o ambos nos movíamos hacia la barandilla existente a lo largo del corredor. Siguiendo el consejo de un experto en acústica arquitectónica, Robert S. Shankland, hablé con mi amiga usando palabras elegidas cuyo sonido produjera alta o baja frecuencia. Como ya me imaginaba, las palabras dominadas por ondas de alta frecuencia eran las más fáciles de entender.



Detalle del modelo

Mientras estaba en la galería noté que la pared no sólo estaba inclinada hacia dentro, sino que tenía además un gran borde en la parte alta. Shankland cree que estos dos hechos deben ser responsables, en gran parte, de las singulares características acústicas de la galería. Ninguna otra de las muchas galerías circulares existentes en el mundo que carecen de estas características poseen las mismas aptitudes acústicas.

Existen "salas de los secretos" del tipo de reflexión simple en muchos lugares. Algunas, tales como el viejo vestíbulo de la Cámara de Representantes del Capitolio de Washington, se han hecho famosas por su capacidad de trasmitir incluso leves murmullos. En 1851 se construyó el vestíbulo dentro de la estancia de las Estatuas y se convirtió, como indicó el experto en acústica Wallace C. Sabine, en "una de las más perfectas salas de los secretos". El techo era una sección de esfera, cuyo centro de curvatura caía casi a la altura de la cabeza. Cuando alguien se ponía en el centro y hablaba en voz baja, el sonido hacía eco y volvía al centro, concentrado por la superficie esférica. A veces, los guías colocaban a una persona en un extremo y a otra en el opuesto, a una distancia casi igual del centro, donde un murmullo de una sería reflejado y concentrado parcialmente hacia la otra. En 1901, tras un incendio, se procedió a la restauración del vestíbulo y se cambió el techo de madera pulida por otro de acero y escayola, junto con paneles suspendidos, altorrelieves y nervaduras. Como consecuencia de la abundancia de entrantes y salientes en el techo se redujo mucho la simple reflexión y concentración y el vestíbulo perdió puntos en su calificación de "sala de los secretos".

El santuario mormón en Salt Lake City constituye un ejemplo de "sala de los secretos" elipsoidal, aunque la forma interior no sea un elipsoide perfecto. Los sonidos procedentes de la mesa del lector situada en la parte frontal se transmiten por reflexión y se concentran hacia la parte de atrás, haciendo que éstos sean audibles en la parte delantera del anfiteatro posterior.

Según Herschel una reflexión similar en un interior elipsoidal fue causa de gran perplejidad en Sicilia poco después de ser construida la vieja catedral de Girgenti. Aunque los detalles del interior fueron examinados más tarde por Sabine, Herschel mantiene que uno de los focos interiores fue elegido inadvertidamente para ubicar el confesionario; por ello, cualquier persona que estuviera en el otro foco podía oír incluso las más secretas confesio-

nes. El mismo Herschel escribió: "este punto fue descubierto por accidente y la persona que lo hizo se complugo durante algún tiempo en escuchar, y en llevar a sus amigos con él a oír, confesiones que concernían exclusivamente al sacerdote. Se dice que un día acudió a confesarse su esposa y tanto él como sus amigos tuvieron acceso a ciertos secretos que eran todo lo contrario de divertidos para uno de ellos".

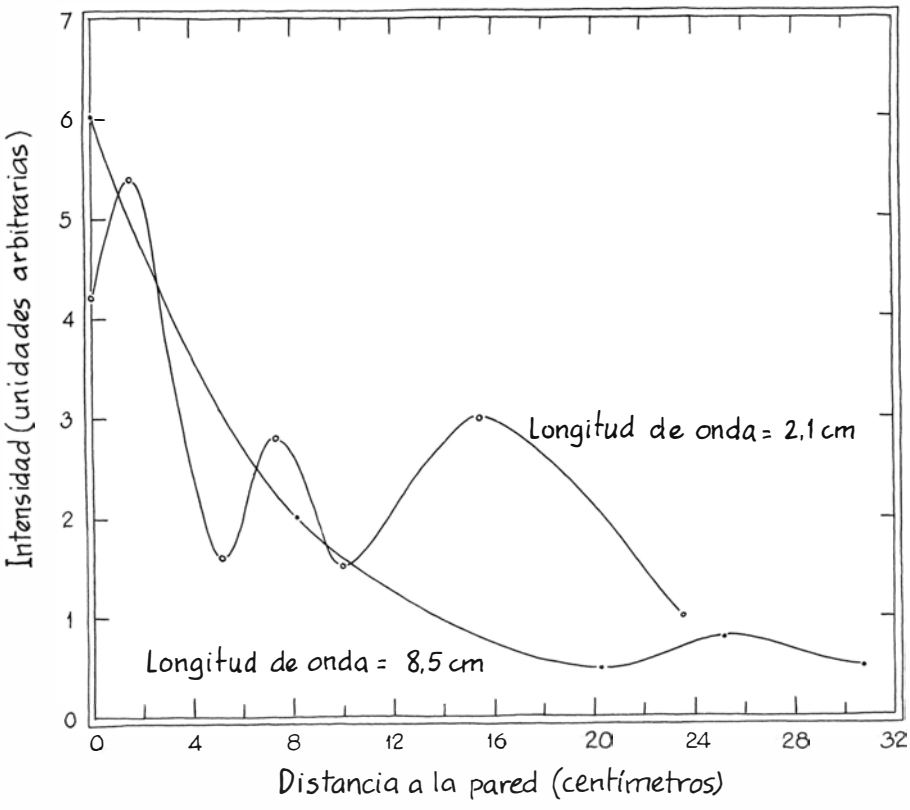
Se supone que existen "salas de los secretos" de los dos tipos generales debajo de los arcos bien pulidos de algunos puentes. En 1948 fueron analizados algunos de estos arcos separadamente por Herbert Grove Dorsey y Arthur Taber Jones para comprobar si las propiedades acústicas se debían a las ondas superficiales de Rayleigh. Por ejemplo, Dorsey investigó el arco existente bajo el puente de la Avenida Massachusetts sobre Rock Greek, en Washington. Este arco circular tiene un diámetro de 45 metros y una anchura de 22,5 metros. Ambos extremos terminan en una base de hormigón liso que produce ecos penetrantes. De acuerdo con la suposición de Rayleigh, las ondas rebotarían de un lado al otro del arco a medida que se adhiriesen a la superficie interior. Dorsey sostenía que si uno se colocaba próximo a la pared del arco aprovechando la quietud existente por la mañana, se podían oír dos ecos distintos: si la fuente sonora era un ligero susurro o la caída de un alfiler dentro de una cajita de cartón desde una altura de algo más de un centímetro. Una palmada producía de 5 a 10 ecos.

Más tarde, Jones investigó sobre un puente similar en Newton Upper Falls (Massachusetts), pero no pudo confirmar la hipótesis de Dorsey de que el sonido se propagaba a lo largo de un arco como lo hacen las ondas de superficie de Rayleigh. Jones sostenía que si estuvieran implicadas las ondas de superficie, un observador colocado en el punto central bajo el arco no oiría los ecos que se producirían cuando otra persona diera palmadas en un extremo del mismo, ya que el sonido estaría limitado a un cinturón relativamente estrecho justo debajo de la superficie del arco. Poniendo a un observador debajo del puente, Jones descubrió que los ecos eran aparentemente tan abundantes allí como en los extremos del arco. Así pues, la contribución de las ondas superficiales a los ecos múltiples quedó sin concretar.

Algunas formaciones naturales tienen propiedades similares a las de las "salas de los secretos". La Oreja de Dionisio, una gruta de una vieja cantera cercana a Siracusa en Sicilia, es una de ellas. La gruta, en forma de *S* invertida y horizontal, mide 67 metros de longitud por 22 metros de altura. La anchura de la gruta es de unos 10 metros en el suelo, pero la *S* se va estrechando hacia arriba hasta que mengua a uno o dos metros. En el extremo de la *S* opuesto a la cantera, cerca del techo de la gruta, una pequeña abertura conduce a un corto pasadizo que, a su vez, desemboca en una escalera de piedra que llega a la cima de la formación rocosa. Cuando se está de pie en el suelo de la gruta, los ecos de las palabras son tan numerosos que es difícil seguir una conversación. Sin embargo, si se escucha desde la pequeña abertura de la parte posterior de la gruta se pueden oír incluso los susurros de otras personas que estén en el suelo de la gruta. Aun cuando la gruta no sea, en su sentido estricto, una "sala de los secretos", su estructura canaliza de alguna manera el sonido desde el suelo hasta una persona que esté situada en la pequeña abertura de la parte posterior.

El origen de su nombre –Oreja de Dionisio– arranca de cuando el célebre tirano de Siracusa, Dionisio, hizo de la gruta una prisión. Según la leyenda, tenía una diseñada de tal forma que podía oír incluso los leves susurros de los encarcelados y, así frustrar cualquier intento de revuelta.

Si el lector quisiera buscar "salas de los secretos", le sugeriría que probara en cualquier sección de esfera o elipsoide en edificios y formaciones naturales, tales como cúpulas en los techos de bodegas. Se podrían investigar también las arcadas lisas (tales como las existentes bajo los puentes), los interiores de silos y otras grandes estructuras con sección circular. Una vez descubierta una "sala de los secretos", se buscan las ondas superficiales de Rayleigh por medio de un apropiado juego de experimentos, por ejemplo: colocar una barrera relativamente estrecha en la superficie curvada para bloquear cualquier onda superficial.



Resultados de Derov con dos longitudes de ondas

En septiembre de 1977 se describió en esta misma sección un experimento para la creación de arco iris de orden múltiple en el laboratorio; a lo largo de los meses siguientes recibí bastantes cartas de comunicantes que decían haber visto más de dos arcos iris naturales simultáneamente en el cielo. El arco iris primario se produce por una simple reflexión de la luz dentro de una gota de agua al caer. El poco frecuente arco iris secundario se produce por dos reflexiones internas. En el experimento se pueden ver hasta una docena de arcos iris que se forman por un número progresivamente mayor de reflexiones internas en gotas de agua suspendidas de un cable fino.

Yo siempre creía que era imposible ver arcos iris naturales de orden superior al segundo porque sus colores se hacen tan pálidos que desaparecen debido al brillo del cielo, a la luz reflejada por la superficie exterior de las gotas y a la luz transmitida a través de las gotas sin sufrir ninguna reflexión interna. Sin embargo, se ha probado pueden verse arcos iris de orden superior bajo determinadas circunstancias.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

TRANSMISION DIGITAL DE SEÑALES

INFORMATION AND COMUNICATION THEORY. A.M. Rosie. Van Nostrand Reinhold Company Limited.

TECNICAS NUMERICAS. Publicación Especial. Edición primera, noviembre 1975, Centro de Investigación y Estudios (C.T.N.E.).

LIBRO NARANJA, TOMO III-2. C.C.I.T.T. Sexta Asamblea Plenaria, Ginebra, 27 de septiembre-8 de octubre de 1976. U.I.T.

REDES DIGITALES Y TRANSMISION DE DATOS. Pedro Pastor Lozano. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I.T. en prensa, 1978.

FUNCION CEREBRAL Y FLUJO SANGUINEO

CORRELATION BETWEEN REGIONAL CEREBRAL BLOOD FLOW AND OXIDATIVE METABOLISM. Marcus E. Raichle, Robert L. Grubb, H. Gado Mokhtar, John O. Eichling y Michel M. Ter-Pogossian en *Archives of Neurology*, vol. 33, págs. 523-526; agosto 1976.

REGIONAL CEREBRAL BLOOD FLOW IN FOCAL CORTICAL EPILEPSY. Kjeld Hougaard. Tadato Oikawa, Edda Sveinsdottir, Erik Skinhøj. David H. Ingvar y Niels A. Lassen en *Archives of Neurology*, vol. 33, págs. 527-535; agosto, 1976.

CEREBRAL FUNCTION, METABOLISM AND CIRCULATION. Dirigido por David H. Ingvar y Niels A. Lassen en *Acta Neurologica Scandinavica Supplementum 64*, vol. 56; 1977.

LA PARTICULA HYPSILON

OBSERVATION OF A DIMUON RESONANCE AT 9.5 GEV IN 400-GEV PROTON-NUCLEUS COLLISIONS. S. W. Herb et al. en *Physical Review Letters*, vol. 39, n.º 5, págs. 522-525; 1 de agosto de 1977.

PARTICULAS FUNDAMENTALES CON ENCANTO. Roy F. Schwitters en *Investigación y Ciencia*, n.º 15, págs. 32-48; diciembre, 1977.

OBSERVATION OF STRUCTURE IN THE Y REGION. W. R. Innes et al. en *Physical Review Letters*, vol. 39, n.º 20, págs. 1240-1242; 14 de noviembre de 1977.

EL ULTIMO TEOREMA DE FERMAT

HISTORY OF THE THEORY OF NUMBERS. Leonard E. Dickson. Carnegie Institution of Washington, 1919.

THE FERMAT AND HESSIAN POINTS OF A TRIANGLE. H. E. Fettis en *The American Mathematical Monthly*, vol. 53, n.º 2, págs. 74-78; febrero, 1946.

A SUPPLEMENTARY NOTE TO A 1946 ARTICLE ON FERMAT'S LAST THEOREM. H. S. Vandiver en *The American Mathematical Monthly*, vol. 60, n.º 3, págs. 164-166; marzo, 1953.

¿DESENCADENO UNA SUPERNOVA LA FORMACION DEL SISTEMA SOLAR?

A COMPONENT OF PRIMITIVE NUCLEAR COMPOSITION IN CARBONACEOUS METEORITES. R. N. Clayton, L. Grossman y T. K. Mayeda en *Science*, vol. 182, págs. 485-488; 2 de noviembre de 1973.

ALUMINUM-26 IN THE EARLY SOLAR SYSTEM: FOSSIL OR FUEL? Typhoon Lee, D. A. Papanastassiou y G. J. Wasserburg en *Astrophysical Journal*, vol. 211, n.º 2, parte 2, págs. L107-L110; 15 de enero de 1977.

SUPERNOVAE, GRAINS AND FORMATION OF THE SOLAR SYSTEM. James M. Lattimer, David N. Schramm y Lawrence Grossman en *Nature*, vol. 269, págs. 116-118; 8 de septiembre de 1977.

LOS DIBUJOS PREHISTORICOS EN EL SUELO DEL PERU

ANCIENT DRAWINGS ON THE DESERT OF PERU. Paul Kosok y Maria Reiche en *Archaeology*, vol. 2, n.º 4, págs. 206-215; diciembre, 1949.

LIFE, LAND AND WATER IN ANCIENT PERU. Paul Kosok. Long Island University Press, 1965.

GIANT GROUND FIGURES OF THE PREHISTORIC DESERTS. Emma Lou Davis y Sylvia Winslow en *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 109, págs. 8-21; 1965.

WAS HUARI A STATE? William H. Isbell y Katharina J. Schreiber en *American Antiquity*, vol. 43, n.º 3, págs. 372-389; 1978.

LA FORMACION DE MODELOS EN EL DESARROLLO BIOLOGICO

POSITIONAL INFORMATION AND PATTERN FORMATION. Lewis Wolpert en *Current Topics in Developmental Biology*, vol. 6, págs. 183-224; 1971.

SYMPOSIUM ON CELL PATTERNING. Ciba Foundation Symposium 29. Associated Scientific Publishers, 1975.

PATTERN FORMATION IN EPIMORPHIC FIELDS. Vernon French, Peter J. Bryant y Susan V. Bryant en *Science*, vol. 193, págs. 969-980; 10 de septiembre de 1976.

UNA MIGRACION EN MASA DE AVES TERRESTRES SOBRE EL OCEANO

BIRD MIGRATION. Donald R. Griffin. Natural History Press, 1964.

RADAR ORNITHOLOGY. Eric Eastwood. Methuen and Co., 1967.

AUTUMNAL BIRD MIGRATION OVER THE NORTHWESTERN ATLANTIC OCEAN. Timothy C. Williams, Janet M. Williams, Leonard C. Ireland y John M. Teal en *American Birds*, vol. 31, n.º 3, págs. 251-267; mayo, 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

EXCURSIONS INTO MATHEMATICS. Anatole Beck, Michael N. Bleicher y Donald W. Crowe. Worth Publishers, 1969.

MATHEMATICS IN THE TIME OF THE PHARAOHS. Richard J. Gillings. The MIT Press. 1972.

TALLER Y LABORATORIO

THE ECHOES AT ECHO BRIDGE. Arthur Taber Jones en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 20, n.º 5, págs. 706-707; septiembre, 1948.

THE PROBLEM OF THE WHISPERING GALLERY. John William Strutt, Baron Rayleigh, en *Scientific Papers*, vol. V, 1902-1910. Dover Publications, 1964.

WHISPERING GALLERIES. Tom Beer en *Contemporary Physics*. vol. 16, n.º 3, págs. 257-262; mayo, 1975.

ERRATUM

En la página 1 del número 23, agosto de 1978, donde dice "elementos de luz", debe decir "elementos ligeros", en el artículo de Cerny y Poskanzer.

Taller y laboratorio

Lo que los penachos de humos nos dicen sobre las características de la atmósfera

Jearl Walker

La observación de los penachos de humo en el cielo puede ser, a la vez, interesante e instructiva. Es mucho lo que se puede aprender en tal espectáculo sobre cómo varía la temperatura de la atmósfera con la altura. Los penachos de humo adoptan gran variedad de formas, determinadas principalmente por la diferencia de temperatura existente entre el aire de la superficie y el que se encuentra un poco más arriba que la chimenea.

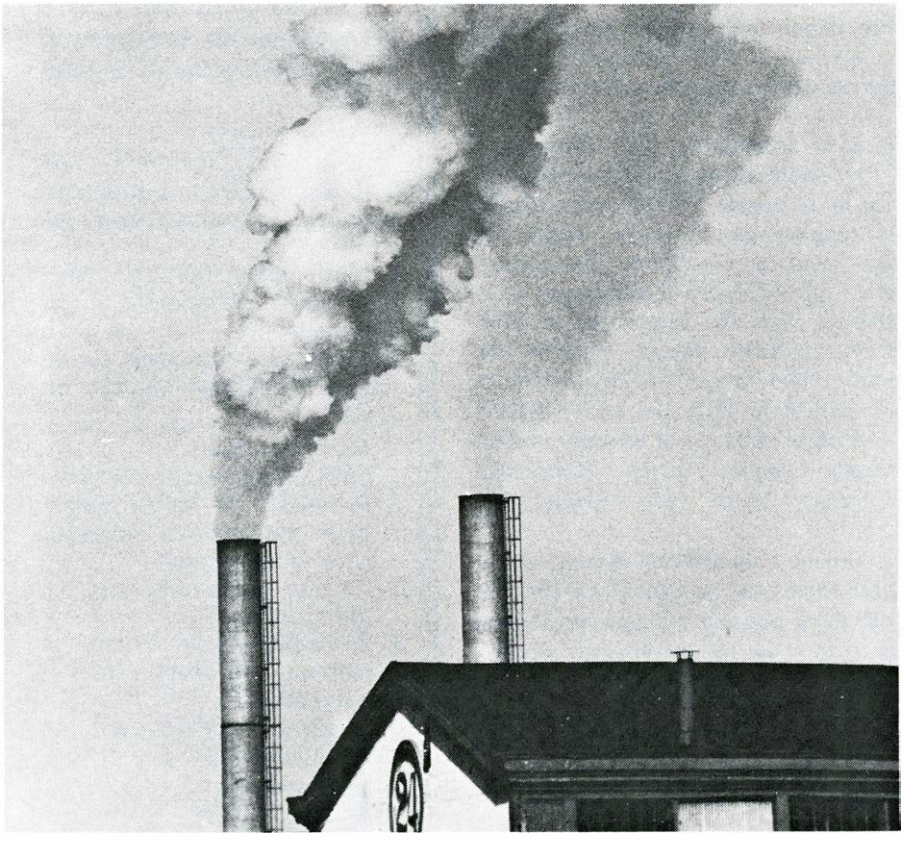
Hay dos tipos básicos de penachos de humo: el de salida a chorro ("momentum jet"), en el cual el impulso hacia arriba del penacho se debe a su propia cantidad de movimiento inicial, y el penacho flotante; éste sube o baja según sea la relación entre su temperatura y la del aire. En los días con viento en calma, ambos tipos de penacho se elevan tomando la forma de un cono vertical invertido, que se va agrandando y cuyo vértice se halla muy cerca de la boca de la chimenea (suponiendo, en el caso del penacho flotante, que el gas que lo forma esté suficientemente caliente). En estos conos, tanto en uno como en otro tipo de penacho, la velocidad es mayor en el eje central del cono y va disminuyendo en dirección hacia el exterior.

Podemos establecer una diferencia entre ambos tipos de penachos: el de salida a chorro puro tiene un ángulo en el vértice del cono de aproximadamente 24 grados, mientras que el flotante puro tiene un ángulo en el vértice de 18 grados, también aproximadamente. No he podido dar con una explicación sencilla y a la vez convincente de tal divergencia. Las cifras anteriores se han deducido a partir de la observación de muchos penachos. Fotografiando un penacho vertical en un día de calma y luego midiendo el ángulo del cono en la fotografía, se puede determinar qué tipo de penacho es el que hemos observado. Si el ángulo es menor de 18 grados, ello se debe a que hay una corriente vertical ascendente, próxima a la chimenea, que hace que el penacho ascienda más rápidamente y, por tanto, hace decrecer el ángulo de su cono.

Un penacho es flotante (y por tanto asciende) si los gases que lo forman están más calientes que el aire a su misma altura, aunque también intervienen otros efectos físicos. Dado que la presión atmosférica decrece con la altura, toda porción de gas del penacho que ascienda debe expandirse al subir. La energía necesaria para expandirse la toma de la energía de las moléculas que lo forman, y no de ninguna fuente exterior. Esta energía interna es la energía cinética de las moléculas en su movimiento arbitrario.

La temperatura de un gas nos da una medida de su energía interna; mientras mayor sea su temperatura, mayor será la energía cinética de sus moléculas. Si parte de dicha energía se ha consumido en aumentar el volumen del gas, su temperatura habrá descendido necesariamente. Dicho cambio de temperatura, que no implica un intercambio de calor con el medio que rodea al gas, recibe el nombre de cambio adiabático. Por tanto, toda porción de gas, al ascender en un penacho de una chimenea, se expande enfriándose adiabáticamente. De igual manera, si se obliga a descender a una porción de gas de un penacho, ésta se contraerá y se calentará adiabáticamente conforme el aire que la rodea actúe sobre ella haciéndola bajar.

En un gas que sale por una chimenea, la continuación o no de su ascensión dependerá del cambio que experimente la temperatura del aire ambiente en relación con la altura. Por ejemplo, si un penacho al salir se enfría, pero aún así sigue siendo más caliente que el aire ambiente, continuará ascendiendo de forma acelerada. Por otra parte, si el gas llega a ponerse más frío, en su ascensión, que el aire que lo rodea, detendrá su ascenso



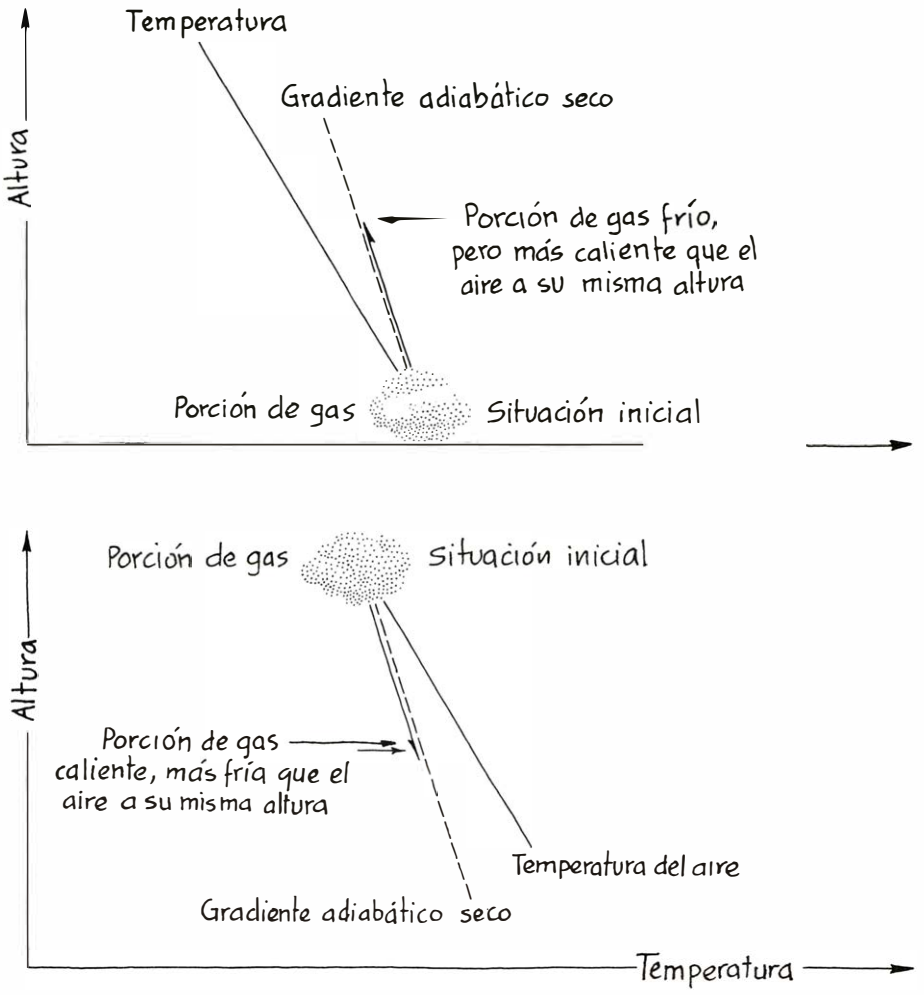
Un penacho de humo tipo vórtice o remolino

y comenzará a bajar. Si la temperatura se iguala, el penacho subirá a velocidad constante.

Cuando un gas se mueve inicialmente hacia abajo, se calienta adiabáticamente, pero su temperatura puede ser superior, inferior o igual que la temperatura del aire ambiente en cada momento, dependiendo de cómo cambie la temperatura del aire en relación con la altura. En el momento en que la temperatura del gas sea mayor que la temperatura del aire, detendrá su descenso. Mientras sea menor, el descenso proseguirá incluso de forma acelerada. Si la temperatura es la misma, continuará descendiendo pero a velocidad constante. Muchas de las formas características de los penachos que se pueden observar dependen de esta interrelación entre la ascensionalidad y las relaciones de enfriamiento o calentamiento en consecuencia de cómo varíe la temperatura de la atmósfera en relación con la altura.

Toda porción de gas de un penacho de humo cambia su temperatura adiabáticamente –lo mismo al subir que al bajar– a razón de un grado Celsius por cada 100 metros de variación de la altura, aproximadamente. Esta razón se llama gradiente adiabático seco; la palabra "seco" indica que no se produce condensación. Dependiendo de las condiciones atmosféricas y de las fuentes de calor de los alrededores, la temperatura del aire puede descender con la altura más o menos rápidamente, o incluso en la misma proporción en que lo hace el gradiente adiabático seco de temperatura. Cada uno de los tipos anteriores de variación es un ejemplo de un gradiente negativo para el aire, debido a que su temperatura, en cada uno de los casos, decrece con la altura. Sin embargo, la temperatura del aire puede llegar a crecer con la altura; es lo que se llama inversión térmica. El aire tiene entonces un gradiente positivo.

Si los gases están húmedos, el gradiente puede cambiar. La razón es que, conforme el gas se enfría, su humedad relativa se hace mayor; una vez que se alcanza el 100 por ciento de humedad, cualquier enfriamiento posterior provoca la condensación en forma de pequeñas gotitas de una parte del vapor de agua existente en el gas. El cambio de estado, de pasar de vapor a líquido, libera energía y evita que esta porción de gas se enfríe tan rápidamente como lo hubiese hecho de no existir el efecto de condensación. En otras palabras, parte de la energía necesaria para la expansión del gas se toma ahora del cambio de estado del agua, y, por tanto, se gasta menos cantidad de la energía interna del gas. La velocidad media a la cual una porción ascendente de gas cambia su temperatura con la altura se llama gradiente adiabático saturado. Cuando un gas húmedo comienza a ascender, se va enfriando de acuerdo con su gradiente adiabático seco, hasta que comienza a producirse la condensación; a partir de entonces, seguirá enfriándose, pero ya según el gradiente adiabático saturado. Esta variación en el ritmo o velocidad de enfriamiento afecta a los penachos húmedos del tipo de los que emiten las centrales térmicas; en ellos, los gases no se enfrían tan rápidamente mientras asciende como lo hacen en los penachos secos.

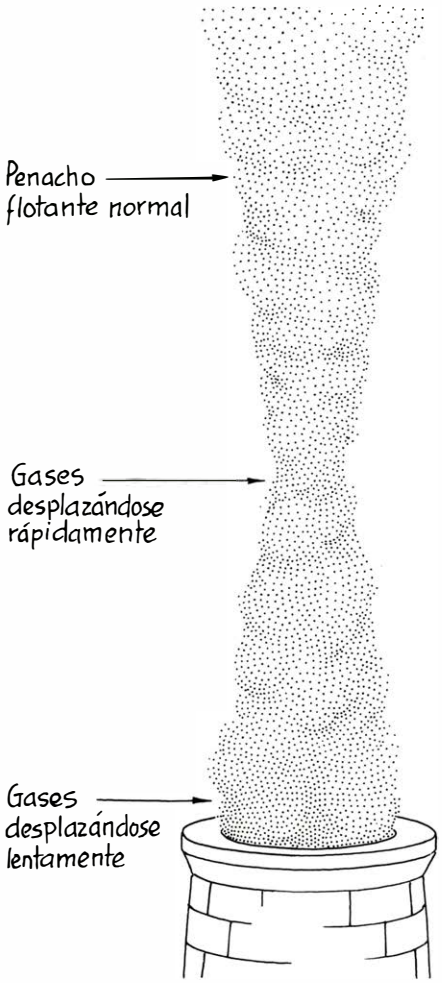


Comportamiento de una porción de gas al ascender (**arriba**) *o al descender* (**abajo**)

Cabe la posibilidad de que un penacho de los de salida a chorro, al expansionarse un tanto, se comporte básicamente como un penacho flotante. Existe otro tipo de penachos que se forman en los días de calma, y que a mí me resultan extraños. Son los que tienen una velocidad inicial de los gases muy pequeña, lo cual puede ocurrir cuando en las chimeneas caseras existe una abertura demasiado grande; por tanto, el penacho no se expande inicialmente como un cono sino que se contrae hasta que la velocidad ascensional se incrementa suficientemente y, a partir de entonces, se expansiona como un penacho flotante normal.

Se puede ver un ejemplo similar, aunque invertido, de este estrangulamiento en el fregadero de la cocina. La corriente de agua, al salir del grifo, cae, aumenta su velocidad y se estrecha. Este estrechamiento no se debe a la presión atmosférica, ya que dicha presión permanece constante a todo lo largo de la caída del agua.

Para ponerlo más claro imaginemos una sección transversal de la corriente de agua cerca de la salida del grifo y otra un poco más abajo. Cada segundo pasa una determinada cantidad de agua a través de la sección superior. La misma cantidad deberá pasar también por la sección inferior en el mismo tiempo; de lo contrario, tendríamos que, por arte de magia, cierta cantidad de agua aparecería o desaparecería entre los dos niveles. Puesto que la velocidad a través de la sección inferior es mayor, el agua necesita menor sección de paso para que



Un penacho flotante y convergente

fluya la misma cantidad cada segundo. La corriente, por tanto, se estrecha.

Los gases calientes al salir por una chimenea con poca velocidad no pueden expandirse de la misma forma que lo haría un penacho flotante; y ello porque la forma típica del cono requiere una determinada relación entre la velocidad inicial y la flotabilidad. Como consecuencia, los gases se elevan primero como un chorro, aceleran luego su ascenso merced a su flotabilidad y contraen su anchura conforme aumenta su velocidad. Cuando hayan alcanzado una velocidad suficiente como para conseguir la relación requerida, el penacho se expandirá formando un cono. En los días con viento en calma puede ser divertida la búsqueda y observación de penachos convergentes en las chimeneas de las casas o en las fogatas.

Para ver los penachos flotantes más bonitos hay que esperar los días de viento suave y constante, que inclina o dobla los penachos por la parte superior. Cuando han terminado de subir, descienden, se dispersan hacia arriba y hacia abajo, adoptan una forma alargada o forman bucles, según varíe la temperatura del aire de la zona en relación con la altura y según la fuerza del viento en dicha zona. La ilustración de la página siguiente muestra una amplia gama de penachos típicos junto con la variación de la temperatura del aire según la altura que se requiere para cada uno de ellos. El gradiente adiabático seco de temperatura también aparece allí, pero esa línea se puede mover hacia la derecha o hacia la izquierda. La gráfica indica la relación entre el cambio de temperatura y el cambio de altura para una porción de gas de un penacho. Es necesario conocer la temperatura del gas en algún punto determinado (por ejemplo, la parte alta de la chimenea) para que esta línea pueda representar la temperatura del gas en función de la altura. La gráfica entonces habría que moverla a la derecha o a la izquierda para que diera justo esa temperatura a esa altura.

Si la temperatura del aire decrece con la altura algo menos rápidamente de como lo hace el gradiente adiabático seco de temperatura del gas, se limita la ascensión al encorvamiento del penacho por su parte superior, y desciende. Un ascenso enfriaría adiabáticamente el gas con la consecuencia inmediata de que dicho ascenso se detendría. Un descenso calentaría el gas adiabáticamente, con lo que también el descenso se detendría. Aunque el perfil de temperatura de la atmósfera esté suficientemente cerca del gradiente adiabático, el penacho se va expandiendo gradualmente produciendo la llamada forma "de cono".

Por el contrario, cuando la temperatura de la atmósfera decrece mucho más rápidamente con la altura que el gradiente adiabático seco (a dicha forma de variación se le llama gradiente superadiabático), el calor de la chimenea o del suelo puede provocar grandes remolinos térmicos, suficientes como para atrapar el penacho y hacerlo girar y formar ondas hacia arriba y hacia abajo. Estas circunstancias ocurren en días cálidos, cuando el suelo absorbe rápidamente una cantidad de calor solar antes de que el aire circulante pueda llevárselo. Los remolinos nunca se forman cuando hay viento fuerte, que enfría el suelo, o éste se halla cubierto de nieve.

Si la temperatura del aire tiene un gradiente positivo, es decir, si dicha temperatura se incrementa con la altura, formando una inversión térmica, el penacho se limita a ser una fina corriente de gas que se abre en abanico, cuyo vértice estaría en la chimenea. Cuando una parte de dicho penacho intenta subir, se enfría adiabáticamente poniéndose bastante más frío que el aire ambiente, por lo que su ascenso se frena de inmediato. De modo similar, si una parte del penacho intenta descender, se calienta adiabáticamente poniéndose más caliente que el aire ambiente y, por tanto, frenando su descenso de forma inmediata.

Cuando se produce una inversión térmica por debajo del vértice de la chimenea que impide los movimientos descendentes del humo, la figura que éste forma se la conoce por penacho en elevación. Este tipo de variación de temperatura suele darse al atardecer, cuando el suelo y la parte baja de la atmósfera han comenzado a enfriarse a medida que el sol se va escondiendo, mientras que la parte de la atmósfera próxima a la boca de la chimenea está aún relativamente caliente.

Fumigación es el término que se emplea para el fenómeno que ocurre cuando un gradiente positivo y negativo se dan a la vez con una inversión sobre la región donde el gradiente es negativo. La inversión impide que el penacho se difunda hacia arriba; al calentar entonces los humos el suelo, se provoca la aparición de remolinos que arrastran los humos hasta el mismo nivel de la superficie. Esta situación ocurre con frecuencia por la mañana, cuando el suelo y la parte baja de la atmósfera comienza a calentarse.

Un perfil de temperatura similar, pero cuyo gradiente sea menos empinado cerca del suelo, da lugar a un efecto sifón entre el nivel en el que esté la inversión y el suelo. El penacho se difunde hacia el suelo sin que sea necesaria la existencia de una gran turbulencia provocada por la mayor temperatura del suelo.

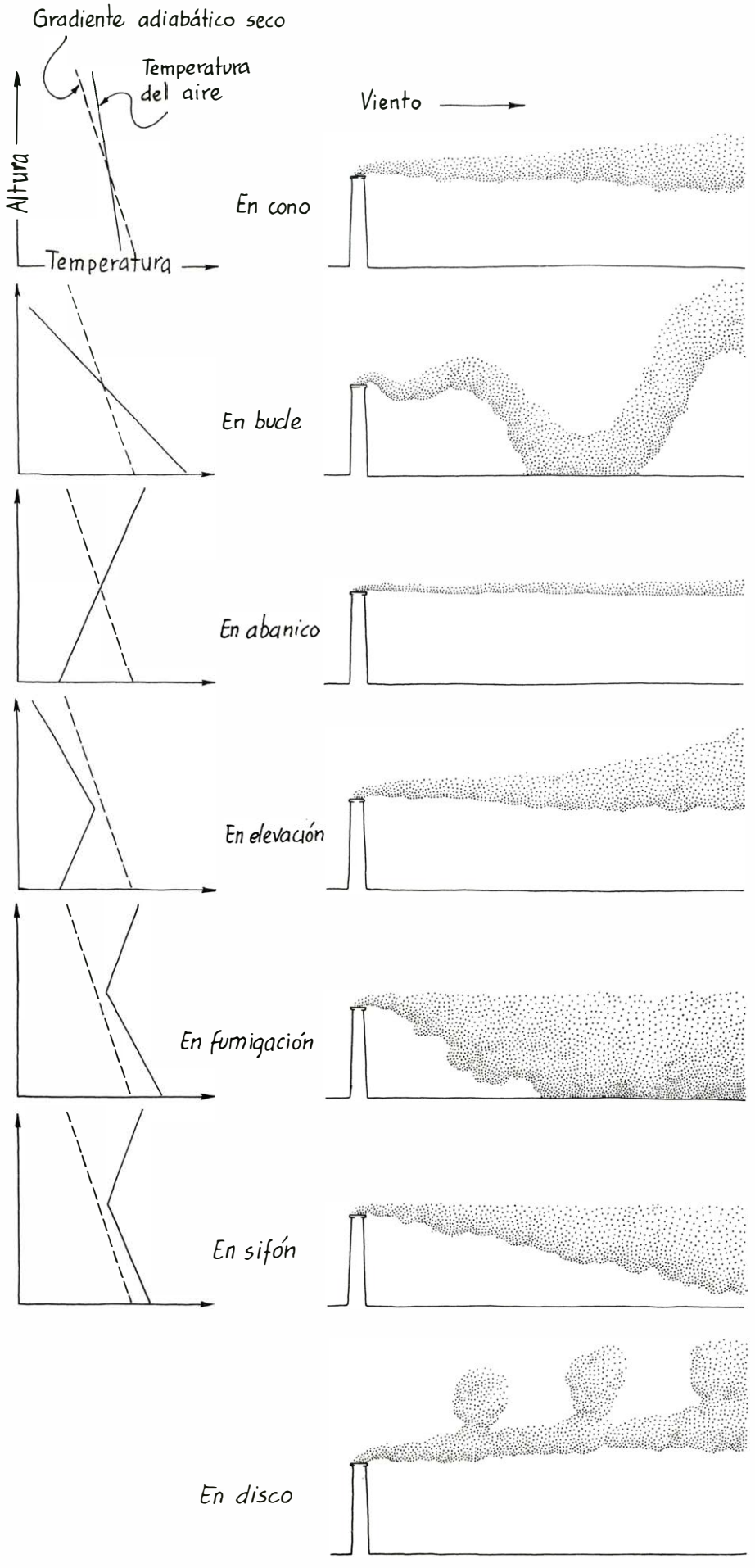
Mas si el penacho se produce en forma de cono o en elevación, puede ser lo suficientemente caliente como para lanzar hacia arriba chorros de aire caliente, dando lugar a que asciendan burbujas de aire caliente con forma de buñuelos, con un intenso movimiento ascendente por el centro y otro movimiento, más débil, descendente, por la parte de fuera. Tales corrientes, que se dan en las zonas de la atmósfera por encima de las fábricas, son aprovechadas por los pilotos para ganar altura.

La forma del penacho en cada uno de estos casos fundamentales puede modificarse si el humo abandona la chimenea con una gran cantidad de movimiento. Por ejemplo, si en las situaciones de fumigación o de sifón la capa con inversión térmica es relativamente delgada, un penacho con una cantidad de movimiento inicial suficiente puede penetrar en dicha capa en lugar de permanecer

confinado debajo de ella. En algunas localidades en donde se registra con frecuencia o de forma persistente la inversión térmica, suelen diseñarse sus chimeneas de suerte que, en su salida, los gases reciban una cantidad de movimiento suficiente como para que penetren en la capa de inversión antes de que el penacho se ponga horizontal. Así se reduce considerablemente la polución a nivel del suelo.

Las formas que adoptan los penachos, según sean húmedos o secos, divergen un tanto debido a que el gradiente adiabático es menos pronunciado una vez que el agua contenida en los gases comienza a condensarse. Algunos penachos, los que se producen en las centrales térmicas por ejemplo, son visibles gracias al agua que se condensa casi inmediatamente después de salir, produciendo una estela blanca. Sin embargo, la mezcla de los humos con el aire ambiente provoca rápidamente la evaporación, de ahí que la parte visible del penacho sea pequeña. En algunas ocasiones los humos o gases son lavados antes de salir por la chimenea, haciéndolos pasar por unas duchas que rocían agua con el fin de quitarles polvo o sustancias contaminantes. En esos casos, los gases, al salir por la chimenea, llevan realmente agua en estado líquido, de suerte que cuando el agua se evapora, al mezclarse los gases con el aire ambiente, el penacho se enfría en virtud del gasto de energía que ha sufrido en la evaporación. (Cuando nos secamos la piel soplando sobre ella, sentimos frío debido a que es el propio cuerpo el que suministra la energía necesaria para evaporar el agua haciéndola pasar del estado líquido a vapor.) Como resultado de este rápido enfriamiento, el penacho caerá, llegando al suelo probablemente muy cerca de la chimenea.

Si se observa y se va fotografiando el penacho de una chimenea a lo largo de un día completo, se verá cómo cambia a medida que el suelo se vaya calentando o enfriando. Al amanecer, la tierra y la parte baja de la atmósfera están frías; ello permite la formación de penachos en forma de abanico o en elevación. Conforme el suelo va absorbiendo energía solar, tanto éste como la capa inferior del aire se va calentando, y comienzan a formarse turbulencias. Esta cálida y turbulenta capa de aire se va haciendo cada vez más ancha, desarrollando las formas de fumigación o de sifón. Ambos efectos hacen que el penacho descienda hasta el nivel del suelo. Más tarde, cuando se ha calentado ya el aire de la zona superior, el penacho puede desarrollarse en forma de cono, pueden salir de él una especie de chorros en disco de aire o (si el calen-



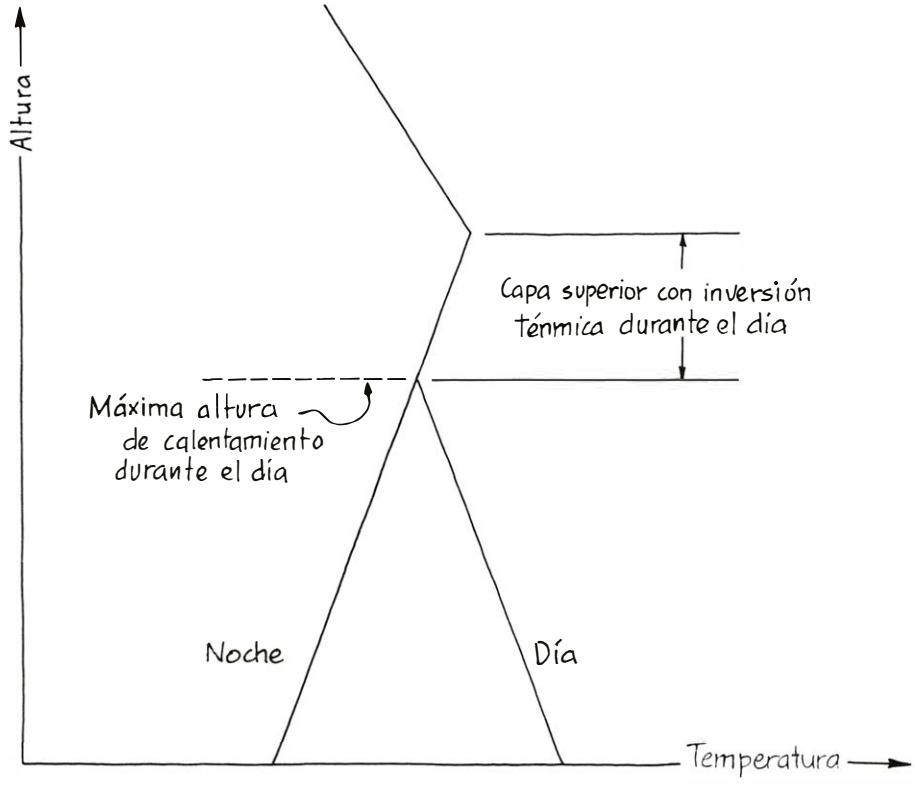
Tipos de penacho creados según la variación de la temperatura del aire con la altura

tamiento del suelo ha sido muy fuerte) puede adquirir forma serpenteada, en bucle. Después del mediodía, cuando la intensidad de los rayos del sol disminuye, y tanto el suelo como las capas bajas del aire comienzan a enfriarse por radiación, todos los penachos pueden constituir conos. Al anochecer, en la zona baja de la atmósfera se desarrolla una inversión debido al enfriamiento por radiación del suelo; el penacho comienza a adquirir forma de abanico o en elevación de nuevo.

Cabe la posibilidad de que alguien observe simultáneamente varias chimeneas de distintas alturas. En Cleveland puedo ver al menos una docena de chimeneas en un valle poco profundo, y poniéndome en un punto desde donde se domine el valle puedo comparar los tipos de comportamiento de los penachos de humo. Con una distribución apropiada de la temperatura, los penachos de humo emitidos por las chimeneas más altas pueden diferir de los emitidos por las más bajas debido a que los dos conjuntos de humo están en partes diferentes del perfil de temperatura atmosférica. Por ejemplo, las chimeneas altas pueden emitir humo a una zona con un gradiente negativo y mostrar un penacho en elevación, aun cuando las chimeneas más bajas emiten a la inversión y se extienden en forma de abanico. Si se observa un número suficiente de chimeneas se puede estimar dónde se produce el cambio de gradiente negativo a positivo. En días en que hay mucha inversión a baja altura se pueden ver algunos penachos de humo que "pinchan" la inversión mientras que otros se mantienen debajo.

Un penacho de humo puede adherirse a su chimenea. A veces la razón de esto es que el viento forma torbellinos y empuja el humo hacia abajo, a lo largo de la chimenea. Otras veces el descenso del humo puede estar motivado por la situación de la chimenea con relación a los edificios y columnas circundantes. Por ejemplo, si la chimenea está en el lado de sotavento de un gran obstáculo, el viento es obligado a ascender por mor del obstáculo y desciende después por el otro lado, haciendo que el humo también descienda. Si, por contra, la chimenea está en el lado de barlovento, es probable que el humo se eleve empujado por el flujo ascendente del viento.

Si la abertura de la chimenea es demasiado grande para la cantidad de gas que expulsa, y si esta expulsión es lenta, el humo saldrá a bocanadas. Unas veces la boca emitirá gas y humo de forma normal, otras el aire frío del exterior penetrará por la chimenea impidiendo la expulsión. Llegará un momento en que los gases calientes se unan de nuevo y consigan salir otra vez por la chimenea, produciendo otra bocanada de humo, hasta que se vuelva a repetir el proceso.



Variación diaria de la temperatura del aire con respecto a la altura

Si la chimenea expulsa un penacho flotante que no sufre mucha mezcla por turbulencia, éste se bifurcará casi inmediatamente. La velocidad es mayor en el centro del humo expulsado que en el exterior, lo que obliga al humo a circular formando dos torbellinos, de dirección ascendente en el medio y descendente en el exterior. Los dos torbellinos resultantes dividen el penacho de humo. Esto lo puede comprobar cualquier observador si tiene la oportunidad de acercarse a una chimenea que expulse un penacho flotante en un día de viento tranquilo y sin turbulencias. Deberá colocarse debajo del humo y levantar la vista para fijarse en su centro. Es probable que el movimiento envolvente sea bastante claro mientras se mira al humo saliendo y moviéndose hacia abajo. Y hasta puede verse el firmamento entre las dos corrientes.

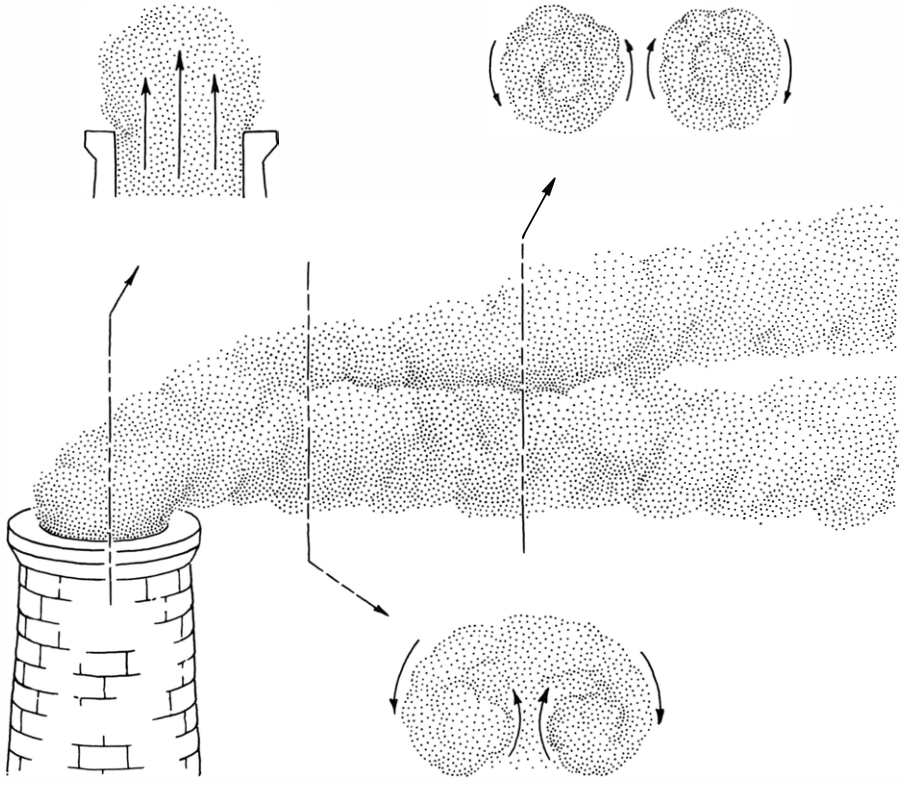
Para hacer un estudio serio del comportamiento del humo, debe intentarse relacionar la mezcla descendente del humo con la forma en que éste se mueve y con las condiciones del suelo situado debajo de éste. Por ejemplo, una chimenea puede emitir un humo que toma la forma de un abanico durante todo el tiempo que permanece sobre la zona del suelo que está relativamente fría y tiene pocos obstáculos para crear una turbulencia a gran escala. Si el penacho con forma de abanico pasa sobre una masa de agua, es probable que el agua y el aire que están entre ambos se hallen más calientes que la tierra. La turbulencia asociada con el agua y el aire más calientes produce fumigación, lo cual hace descender al humo hasta el nivel del agua. He visto chimeneas en Cleveland que emiten penachos finos de humo marrón que pasaban sobre el lago Erie, en donde se producía la fumigación y el material marrón descendía y se mezclaba al nivel del agua.

La fumigación puede desarrollarse también a partir de penachos en abanico si éstos pasan sobre fuentes de calor artificiales, como una ciudad por ejemplo. Allí el calor mezcla el aire hasta un nivel de unas tres veces la altura media de los edificios. Si el observador pudiera encontrar una chimenea humeante que fuera visible desde muy lejos, se podría ver el paso del humo desde la forma de abanico a la de fumigación, a medida que éste atraviesa una fuente de calor natural o artificial.

Los accidentes del terreno pueden afectar de otras formas al humo. Un valle estrecho puede ayudar a mantenerlo cerca del suelo si se desarrolla una inversión térmica sobre el aire frío atrapado en el valle. Cualquier penacho de humo que se cree debajo de la inversión

no podrá penetrar la capa de ésta y escapar a no ser que tuviera una cantidad de movimiento a la salida lo suficientemente alta para conseguir la penetración mientras se estuviera aún comportando como un penacho de salida a chorro.

Esta retención de humos nocivos en algunos valles ha ocasionado varios desastres. En el valle del Mosa, en Bélgica, se desarrolló una inversión en diciembre de 1930, reteniendo en la cuenca las emisiones de las acerías y de las plantas químicas. Como consecuencia de esto murieron 60 personas en tres días, la mayoría por fallo respiratorio; se contaron por miles las que contrajeron enfermedades graves. Es difícil creer que las autoridades, en lugar de interrumpir las emisiones, achacaran el incremento de diez veces en el número de muertes a una extraña y desconocida enfermedad, llegando incluso a sostener un biólogo que la causa era una plaga. Algún tiempo más tarde, se culpó a la polución industrial, pero se hizo muy poco para atajarla. En septiembre de 1972, el valle volvió a sufrir una inversión térmica que condujo de nuevo a la retención de la polución y fue causa de muchas enfermedades, aunque esta vez no mortales.



Un penacho dividiéndose en dos remolinos

La famosa niebla que caracterizó a Londres en otros tiempos se debía al abundante uso del carbón en las fábricas y en las casas, que vertían diariamente toneladas de anhídrido sulfuroso al aire. Al condensarse el agua en las partículas, se formaba una niebla espesa y marrón (la llamada "puré de guisantes"). En diciembre de 1952 se lanzaron a la atmósfera ambiente unas 2000 toneladas de anhídrido sulfuroso cada día, y se produjo una inversión térmica sobre el aire más frío del suelo que mantuvo retenido el humo de las casas y fábricas por debajo de ellas. Debido a la ausencia de viento que lo dispersara, el anhídrido sulfuroso se concentró sobre la ciudad durante cuatro días y cuatro noches, tornándose el cielo primero amarillo, después marrón y, finalmente, negro. A consecuencia directa de la polución murieron unas 4000 personas y otras 8000 murieron después por complicaciones respiratorias causadas por la fuerte inversión.

Si un observador dispone salir a observar el humo de las chimeneas, pero el día resulta ser demasiado lluvioso, puede quedarse en casa y examinar el humo procedente de un cigarrillo. Cerca de la punta encendida, la corriente de humo es uniforme y delgada, unos centímetros más arriba se rompe y forma remolinos para acabar dispersándose. Para distinguir esta transición hay que estar en una habitación al abrigo de corrientes de aire o en un tubo de vidrio grande abierto por ambos extremos. Cuando ascienden los gases procedentes de la punta encendida tienen mucha fuerza, porque están más calientes que el aire de la habitación. Sin embargo, dado que la velocidad inicial es relativamente baja, los gases calientes suben formando una corriente fina. Después de algunos centímetros, quizá de unos 30, la aceleración hacia arriba ha incrementado la velocidad hasta el punto en que la corriente se hace inestable y empieza a romperse y a formar remolinos.

En el agua que circula por las tuberías sucede una transición similar, que pasa de corriente laminar a turbulencia. Si el agua circula despacio (el significado de "despacio" depende del radio de la tubería y de la densidad y viscosidad del agua) se mueve con suavidad. Cada pequeña porción de agua fluye a lo largo de una línea paralela a la pared de la tubería. Pero a una determinada velocidad ya no fluye con la misma suavidad, sino que se mueve de manera inestable, se forman remolinos y cada pequeña cantidad de agua sigue una ruta irregular a lo largo de la tubería. Estos remolinos se pueden hacer visibles en una tubería transparente echando colorante al agua. En la corriente de humo producida por un cigarrillo, las partículas de éste nos permiten ver el curso seguido en su evolución.

Si el cigarrillo no tiene filtro, se puede notar una lenta corriente de humo que emerge del extremo no encendido. Esto es debido a que los gases que transportan el humo, después de haber pasado a lo largo del cigarrillo, se han enfriado, salen a la temperatura que reina en el ambiente, más o menos, y, por tanto, carecen de fuerza ascendente.

Los indios americanos usaban fogatas de humo para comunicarse entre grandes distancias. En el libro "Natural Aerodynamics", R. S. Scorer describe cómo los aborígenes australianos enviaban señales de humo a mayores distancias todavía. Mientras unos construían una fogata con grandes palos, otros echaban encima arbustos verdes. La altura de la fogata incrementaba la circulación del aire a través del fuego, se avivaba el fuego y los arbustos producían así un humo espeso. Con un esfuerzo coordinado de los trabajadores se puede llegar a hacer ascender una térmica llena de humo. Cuando se hizo esto con la inversión de temperaturas de la montaña o del atardecer, la térmica ascendía hasta que su temperatura era igual que el aire del ambiente, en cuyo punto el humo se difundía horizontalmente para dibujar una forma parecida a un champiñón gigante. Los trabajadores podían controlar la altura en la cual se realizaría la expansión horizontal, estimando cuidadosamente el grado de calor y de altura de la fogata. Si la ocasión era especialmente significativa, los trabajadores podían dibujar hasta seis champiñones sobre la fogata.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ARMAS DE RADIACION INTENSIVA

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS. Dirigido por Samuel Glasstone y preparado por el United States Department of Defense. Government Printing Office, 1977.

NUCLEAR POWER ISSUES AND CHOICES. Nuclear Energy Policy Study Group. Ballinger Publishing Company, 1977.

CUANDO EL MAR NEGRO SE DESECABA

HISTORY OF THE MEDITERRANEAN SALINITY CRISIS. Kenneth J. Hsü, Lucien Montadert, Daniel Bernoulli, Maria Bianca Cita, Robert E. Garrison, Robert B. Kidd y Frederic Mèlierés, Carla Müller y Ramil Wright en *Nature,* vol. 267, n.º 5610, págs. 399-403; 2 de junio de 1977.

INITIAL REPORTS OF THE DEEP SEA DRILLING PROJECT: Vol. 42, B. David A. Ross y Yu. Neprochnov. Government Printing Office, en prensa.

LA RADIACION COSMICA DE FONDO Y EL NUEVO MOVIMIENTO DEL ETER

THE FIRST THREE MINUTES: A MODERN VIEW OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE. Steven Weinberg. Basic Books, Inc., 1977.

DETECTION OF ANISOTROPY IN THE COSMIC BLACKBODY RADIATION. George F. Smoot; Marc V. Gorenstein y Richard A. Muller en *Physical Review Letters,* vol. 39, págs. 898-901; 1977.

RADIOMETER SYSTEM. Marc V. Gorenstein, Richard A. Muller, George F. Smoot y J. Anthony Tyson en *Review of Scientific Instruments,* vol. 49, n.º 4, págs. 440-448; abril, 1978.

EL NUCLEOSOMA

CELL AND MOLECULAR BIOLOGY. An appreciation. Eugene Ronseberg. Holt Rinehart & Winston, Inc., N.Y. 1971.

REFLECTIONS ON BIOCHEMISTRY. A. Kornberg, B.L. Horecker, L. Cornudella y J. Oró. Pergamon Press, 1976.

DIFFERENTIAL NUCLEASE ACTION ON NUCLEI & CHROMATIN FROM DEVELOPING GERM CELLS OF THE ECHINODERM *Holothuria tubulosa.* E. Rocha y L. Cornudella en *Biochem. Biophys. Res. Commun.,* vol. 68, n.º 4, págs. 1073-1081; febrero, 1976.

CAMBIOS EN LA ESPERMATOGENESIS Y DISTRIBUCION DE RIBOSOMAS EN EL EQUINODERMO *Holothuria tubulosa.* Luis Cornudella en *Avances de la Bioquímica,* eds. L. Cornudella, C.F. de Heredia, J. Oró y A. Sols. Salvat Editores, S.A., págs. 39-50, 1977.

EL SISTEMA DE APAREAMIENTO DE LEK DEL GALLO DE LAS ARTEMISAS

THE STRUT DISPLAY OF MALE SAGE GROUSE: A "FIXED" ACTION PATTERN. R. Haven Wiley en *Behaviour,* vol. 47, n.º 1 y 2, págs. 129-152; 1973.

EVOLUTION OF SOCIAL ORGANIZATION AND LIFE-HISTORY PATTERNS AMONG GROUSE. R. Haven Wiley en *Quarterly Review of Biology,* vol. 49, n.º 3, págs. 201-227; septiembre, 1974.

EL PRINCIPIO DE ADYACENCIA EN LA PERCEPCION VISUAL

VECTOR ANALYSIS IN VISUAL PERCEPTION OF ROLLING MOTION: A QUANTITATIVE APPROACH. Gunnar Johansson en *Psychologische Forschung,* vol. 36, n.º 4, págs. 311-319; 1974.

LOCAL AUTONOMY IN VISUAL SPACE. Walter C. Gogel y D.H. Mershon en *Scandinavian Journal of Psychology,* vol. 18, págs. 237-250; 1977.

UNIONES INTERCELULARES

CELL COMMUNICATION. Dirigido por R. P. Cox. John Wiley & Sons, Inc., 1974.

STRUCTURE AND FUNCTION OF INTERCELLULAR JUNCTIONS. L. Andrew Staehelin en *International Review of Cytology,* vol. 39, págs. 191-283; 1974.

FUNCTIONAL SIGNIFICANCE OF THE VARIATIONS IN THE GEOMETRICAL ORGANIZATION OF TIGHT JUNCTION NETWORKS. Barbara E. Hull y L. Andrew Staehelin en *The Journal of Cell Biology,* vol. 68, n.º 3, págs. 688-704; marzo, 1976.

GAP JUNCTION STRUCTURES, I: CORRELATED ELECTRON MICROSCOPY AND X-RAY DIFFRACTION. D. L. D. Caspar, D. A. Goodenough, Lee Makowski y W. C. Phillips en *The Journal of Cell Biology,* vol. 74 n.º 2, págs. 607-628; agosto, 1977.

TECNOLOGIA HIDRAULICA ROMANA

POWER. R. J. Forbes en *Studies in Ancient Technology: Vol. 2.* E. J. Brill, Leiden, 1955.

ROMAN DAMS IN TRIPOLITANIA. C. Vita-Finzi en *Antiquity,* vol. 35, págs. 14-20; 1961.

THE AQUEDUCTS OF ANCIENT ROME. Thomas Ashby, editado por I. A. Richmond. Clarendon Press, 1971.

MAN AND WATER: A HISTORY OF HYDRO-TECHNOLOGY. Norman Smith. Charles Scribner's Sons, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

EXPONENTIAL NUMBERS. Eric T. Bell en *The American Mathematical Monthly,* vol. 41, n.º 7, págs. 411-419; agosto-septiembre, 1934.

SOLUTION TO PROBLEM E 461. H. W. Becker en *The American Mathematical Monthly,* vol. 48, n.º 10, págs. 701-703; diciembre, 1941.

THE NUMBER OF PARTITIONS OF A SET. Gian-Carlo Rota en *The American Mathematical Monthly,* vol. 71, n.º 5, págs. 498-504; mayo, 1964.

THE THEORY OF PARTITIONS. George E. Andrews en *Encyclopedia of Mathematics and Its Applications: Vol. 2,* dirigido por Gian-Carlo Rota. Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Advanced Book Program, 1976.

TALLER Y LABORATORIO

NATURAL AERODYNAMICS, R. S. Scorer. Pergamon Press, 1958.

GENERAL METEOROLOGY. Horace R. Byers. McGraw-Hill Book Company, 1959.

THE BEHAVIOUR OF CHIMNEY PLUMES. R. S. Scorer en *International Journal of Air Pollution,* vol. 1, n.º 3, págs. 198-220; enero, 1959.

SOME RESTRICTIVE METEOROLOGICAL CONDITIONS TO BE CONSIDERED IN THE DESING OF STACKS. Eugene W. Bierly y E. Wendell Hewson en *Journal of Applied Meteorology,* vol. 1, n.º 3, págs. 383-390; septiembre, 1962.

Taller y laboratorio

Experimentos, muy entretenidos, con Polyox, masilla casera y otros fluidos no newtonianos

Jearl Walker

La viscosidad mide la resistencia que se opone al movimiento de un fluido. La viscosidad del agua es bastante baja mientras que la de la miel y la del almíbar son mucho más elevadas. En la mayoría de los fluidos comunes la viscosidad sólo puede alterarse modificando su temperatura: La viscosidad en estos fluidos aumenta cuando baja la temperatura y decrece si ésta sube. A los fluidos de estas características se les llama newtonianos.

En otro tipo de fluidos, llamados no newtonianos, la viscosidad puede alterarse por otros medios, básicamente cizallando el fluido al agitarlo, verterlo o extenderlo. Muchos fluidos domésticos son de este tipo y su utilidad se debe en gran medida a su carácter no newtoniano. Este mes nos ocuparemos del comportamiento de tres tipos generales de fluidos no newtonianos.

En el primero de estos tipos de fluidos, la viscosidad se modifica bruscamente cuando se aplica al fluido una fuerza de cizalladura, volviendo la viscosidad a su valor inicial cuando cesa dicha fuerza. Si al cizallarlo se provoca un aumento de la viscosidad, se dice que el fluido es "dilatante". Algunos ejemplos comunes son: una disolución de almidón, las arenas movedizas, la arena húmeda de la playa, algunas tintas de imprimir y ciertas pinturas. Si al cizallarlo se consigue que la viscosidad disminuya, el líquido se llama "seudoplástico". La mahonesa y ciertas tintas y pinturas presentan este comportamiento. La ventaja de ser seudoplástico se hace más evidente en la tinta. Se quiere que la tinta fluya libremente por el extremo del bolígrafo (al ser cizallada) al ir escribiendo, pero no conviene que dicha tinta fluya, es decir, que se escape cuando el bolígrafo está en el bolsillo.

Cuanto más fuertemente se cizalla un fluido dilatante, mayor será su viscosidad, hasta llegar un punto en el que el fluido ofrece una tremenda resistencia al movimiento. Este tipo de comportamiento fue examinado por vez primera, y en detalle, por Osborne Reynolds en 1885 cuando observó fluidos tales como una mezcla de arena húmeda que se dilataba (expandía) si la cizallaba. Aunque parece que la mayoría de los fluidos dilatantes se dilatan, no es una norma absolutamente general. Pero esto nos da un modelo sencillo para explicar la naturaleza de los fluidos dilatantes.

Hace algunos años, Richard E. Berg, de la Universidad de Maryland, me exhibió una demostración sencilla del modelo de Reynolds para los fluidos que se dilatan. Me hizo estrujar una botella de plástico de medio litro, provista de un tapón con un tubo abierto en su parte superior. Estaba parcialmente llena de arena (también pueden usarse bolitas, pero entonces el efecto es más difícil de ver); rellenó luego con agua hasta el ras del tubo introducido en el tapón. Cuando apreté suavemente la botella de plástico, el material que encerraba me oponía una considerable resistencia. Al apretarlo con violencia, la resistencia fue tal que apenas conseguí estrujar la arena. El nivel del agua cambió también al estrujar la botella, pero su cambio no fue el intuitivamente esperado. El nivel de agua, en vez de ascender, bajó varios centímetros en el tubo.

Reynolds ha explicado este hecho (para la arena) estableciendo que, al principio, los granos están compactados tan estrechamente como les es posible y se encuentran demasiado cerca unos de otros para permitir que el agua, debido a su tensión superficial, ocupe todos los espacios que quedan libres entre los granos. Berg provocó en parte este apelmazamiento de los granos golpeando varias veces la botella. El que la mezcla del interior de la misma ceda cuando se aprieta, significa necesariamente que parte de los granos se mueven uno sobre otro distanciándose entre sí más de lo que estaban al comienzo. A consecuencia de ello, aumenta el volumen total ocupado por los granos, dejando suficiente espacio entre ellos para que el agua fluya a su través. Aunque las paredes de la botella se hallan presionadas con suavidad hacia dentro, este flujo de agua entre los granos provoca que descienda el nivel del líquido en el recipiente.

El modelo de Reynolds explica también el incremento de la resistencia al estrujamiento. Al realizar un apretón súbito, con la consiguiente dilatación, no basta la cantidad de agua presente entre los granos para producir la lubricación necesaria para que los granos puedan resbalar. Por tanto, un cizallamiento brusco provoca una fricción adicional entre los granos y un incremento de la viscosidad aparente de la suspensión. Cuanto más rápido sea el cizallamiento, con mayor celeridad se mueven los granos entre sí, abandonando su estado estrechamente compactado, y menor es la lubricación. El conjunto va aumentando su resistencia al ser apretado. Por el contrario, si la presión se hace más lentamente, el agua puede moverse por el espacio que va quedando entre los granos con lo que el rozamiento se mantiene bajo.

Un ejemplo similar puede observarse en la orilla del mar. Al pasear por la franja de arena que está húmeda, pero no hasta el punto de que los granos floten, las huellas que vamos dejando tienen un aspecto seco y relativamente blando durante un corto intervalo de tiempo, suponiendo –claro está– que hemos mantenido el pie en ese sitio durante un tiempo breve. Si dejamos el pie allí mucho tiempo el efecto se pierde.

Por unos instantes, el peso del pie aplasta la arena. Puesto que la arena se encuentra ya sólidamente compactada, sólo puede desplazarse en dirección a una disposición donde la compactación sea menor. Ello indica que ocupará un volumen mayor, expandiéndose hacia arriba la zona sometida a presión, rebajando el nivel de agua un poco por debajo de la superficie. Con el tiempo, el agua ascenderá a través de los granos que se habían elevado alcanzando la superficie, que volverá a asumir su aspecto húmedo.

Esta demostración puede repetirse sin mayores dificultades en un cajón de arena. Para observar cómo se seca la arena cuando se la somete a presión, basta colocar un trozo de cristal grueso sobre su superficie y empujarlo luego hacia abajo. Me permito recomendar el uso de un émbolo de fontanero para presionar sobre el cristal; con ello, eliminaremos el peligro de cortarnos en caso de que el cristal se rompa.

Las arenas movedizas constituyen otro ejemplo de fluido dilatante. Una suspensión de arena en agua se llama movediza cuando el líquido está sometido a presión, procedente de una pequeña acometida de agua por debajo de la superficie, un manantial natural, por ejemplo. Si a una profundidad cualquiera la presión adicional de agua se hace igual o ligeramente superior a la presión de la arena en dicha profundidad, los granos de arena se separan ligeramente y presentan una buena lubricación. Un objeto pesado situado encima se hundiría hacia el fondo debido a la baja fricción que encuentra con la suspensión.

Si se agita rápidamente la suspensión, aumenta la viscosidad; ello se debe a que los granos se encontraban inicialmente en casi su mayor compactación y, al agitarlos, el

conjunto se dilata un poco. Como antes, una dilatación súbita deja algunos granos sin buena lubricación y, en consecuencia, ofrecen una mayor resistencia al movimiento. Si un objeto, por ejemplo la pierna de un hombre, se sumerge en arenas movedizas, la dilatación presionaría más estrechamente la arena contra el objeto haciendo aún más difíciles sus movimientos. Las arenas movedizas no son tan peligrosas cuando la presión debida a la corriente del agua es grande, ya que entonces los granos están suficientemente separados y la arena no se dilata. Pueden ser incluso arrastrados por la corriente de agua. Las arenas no se convierten en movedizas si no hay una corriente de agua, ya que cualquier agua extra separa la parte superior del lecho fuertemente compactado de arena, creando una situación similar a la que hemos descrito en la playa y en la demostración con la botella de plástico.

El lector puede fabricarse su propio pantano de arenas movedizas. Para ello hay que llenar un recipiente grande con arena y poner una manguera de modo que entre agua por el fondo. Ajustando de forma apropiada la presión del agua en la manguera se pueden levantar ligeramente los granos, para que se conviertan en arenas movedizas. Si la presión del agua es demasiado baja, un objeto de peso medio que se coloque encima de la arena permanecerá quieto, pero cuando la presión del agua sea suficiente como para tornar movediza la arena, el objeto se deslizará a través de ésta hasta el fondo.

La mayoría de la gente no sabe cúal es la mejor manera de escapar de las arenas movedizas. Cuando caen en ellas, piensan que la mejor forma de salir es forcejeando, pero lo que ocurre es que cuanto más luchan, más baten las arenas y mayor es la dilatación de las mismas y la viscosidad aparente. Si alguna vez el lector cayera en arenas movedizas, le aconsejaría que tratara de ponerse a salvo moviéndose tan lentamente como le fuera posible (por supuesto que una persona en esa situación no desea mantenerse casi quieto, porque si así fuera todas estas sugerencias serían innecesarias). Si nos encontráramos hundidos hasta la rodilla, deberíamos tendernos boca arriba en la superficie (para flotar), extender los brazos y liberar las piernas. Una vez alcancen éstas la superficie, hay que ir hacia la orilla dando vueltas o reptando, tratando siempre de mantener el peso del cuerpo repartido en la mayor cantidad de superficie posible. Si se repta, debe hacerse empujando enérgicamente hacia atrás con los pies y las manos a fin de que el carácter dilatante le proporcione un fluido más firme.

El ejemplo más sencillo de un fluido dilatante que puede obtenerse en una cocina lo constituye una simple mezcla de agua y almidón de maíz (o cualquier otro tipo de almidón común). Para hacer la mezcla, se añade agua al almidón hasta que la mezcla esté un poco espesa. Al verter la mezcla, o bien al pasarla a cucharadas a otra taza, se debe dejar que ésta resbale para comprobar que fluye con relativa facilidad a una viscosidad baja. Esto se comprueba dando un puñetazo a la mezcla: si la viscosidad permaneciera en su bajo valor inicial, el fluido saltaría salpicándolo todo. Sin embargo, el rápido cizallamiento hace que la viscosidad tome un valor tan elevado que la salpicadura no llega a producirse, aun cuando el golpe se haya dado con toda energía. Apenas salpica tampoco si arrojamos la mezcla al suelo. De ahí que a los niños les encante manipular con ella.

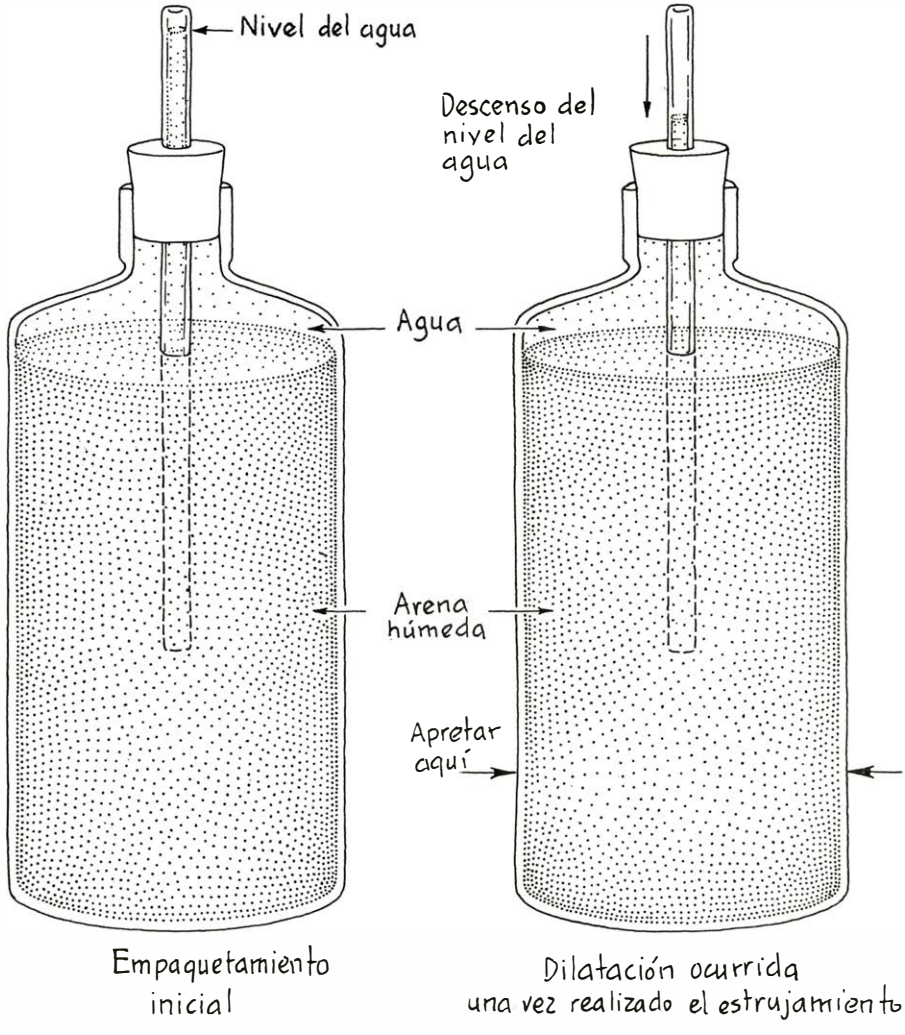
Si el recipiente es pequeño, se puede levantar ligeramente e, introduciendo un palito en la mezcla, tirar de él con vigor. Al levantarlo, el súbito cizallamiento aumenta la viscosidad, de manera que la mezcla se adhiere al palo.

Se han presentado otras teorías distintas de la hipótesis de la dilatación para explicar el comportamiento de los fluidos dilatantes compuestos por suspensiones de partículas. De acuerdo con una de ellas, al friccionar unas partículas contra otras adquieren carga eléctrica. El aumento de la viscosidad se debe entonces a la atracción eléctrica existente entre las partículas.

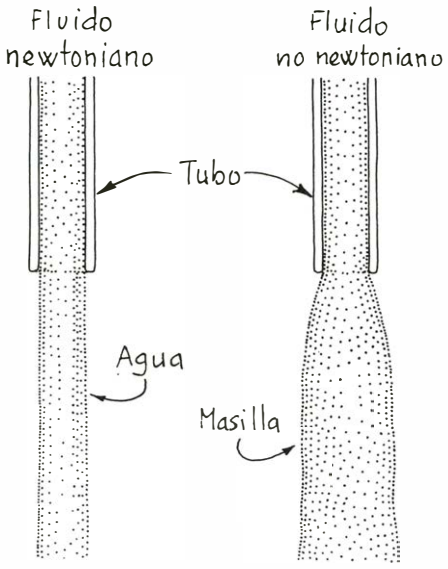
Algunos fluidos dilatantes son suspensiones o soluciones de moléculas de cadena larga (polímeros) que están enrolladas o formando bucles. Cuando el fluido se somete a un cizallamiento, las moléculas se estiran y se alinean perpendicularmente a la dirección del flujo, a consecuencia de lo cual aumentan la viscosidad aparente por oposición a la corriente. El alineamiento ocurre de un modo casi instantáneo y desaparece también con idéntica rapidez cuando cesa la fuerza de cizallamiento.

Se puede extraer abundante información sobre diversos ejemplos de fluidos dilatantes y sobre fluidos no newtonianos en general en una serie de artículos de A. A. Collyer, del Sheffield City Polytechnic de Inglaterra. Dichas publicaciones, cuya referencia bibliográfica se encuentra en la página 112, contienen gran cantidad de demostraciones.

Cuesta más hallar ejemplos de fluidos seudoplásticos. Collyer afirma que dichos fluidos pueden obtenerse mezclando óxido

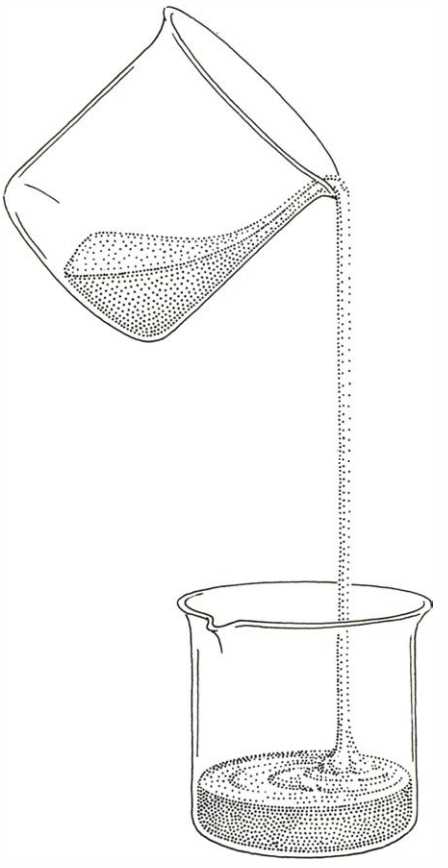


Demostración de un fluido dilatante de Richard E. Berg



El fenómeno de "hinchazón muerta"

de polietileno (frecuentemente llamado Polyox, marca registrada por la Union Carbide Corporation) con agua destilada para obtener una solución al 0,01 por ciento. ("Por ciento" se refiere al peso del soluto con respecto al peso total de la solución.) Para las demostraciones que a continuación describiremos aconsejaría el empleo de Polyox WSR-301, polímero con miles de enlaces de CH_2 y con un elevadísimo peso molecular (aproximadamente cuatro millones de unidades de masa atómica). El Polyox se disuelve lentamente en agua. Collyer recomienda ir formando estratos de Polyox y de agua alternativamente. Durante tres o cuatro días se debe mantener el recipiente tapado, agitándolo de vez en cuando, sin demasiada violencia, pues pueden romperse las moléculas de cadena larga (la Union Carbide Corporation ha tenido la amabilidad de enviarme una cantidad suficiente de Polyox WSR-301. Para obtener una muestra de este producto el lector puede remitirme una tarjeta postal y 2 dólares para gastos de envío al departamento de Física de la Universidad estatal de Cleveland, Cleveland, Ohio 44115).



Autosifón en un fluido viscoelástico

Cuanto más fuerte se bate un fluido seudoplástico, más decrece su viscosidad. A la larga, si la velocidad es lo suficientemente rápida, la viscosidad se estabiliza en un valor pequeño. En cuanto el batido cesa, la viscosidad vuelve a su antiguo valor. Al verter el fluido, parte del mismo se muestra como grumoso comparado con otras porciones, debido, según parece, a que el batido no es uniforme a lo largo de todo el fluido en movimiento y, por ende, tampoco la viscosidad lo es.

Una explicación del comportamiento de los fluidos seudoplásticos sería que, bajo la acción de las fuerzas de cizalladura, las partículas asimétricas o las moléculas largas del fluido se alineasen paralelamente a las líneas de corriente y ofreciesen una menor resistencia al flujo. La viscosidad mínima se obtendría cuando todas las partículas o moléculas se encontrasen alineadas. El grado de alineamiento, y por tanto, la viscosidad del fluido dependen de la intensidad del cizallado.

El otro tipo de fluido no newtoniano es bastante similar tanto a los seudoplásticos como a los dilatantes, si bien su viscosidad depende no sólo de la intensidad del cizallado, sino también del tiempo que éste dure. Una vez que dicha operación cesa, transcurre cierto tiempo hasta que la viscosidad vuelve a recuperar su valor inicial. Estos fluidos son, por tanto, dependientes del tiempo.

Si la viscosidad decrece al batirlo, se dice que el fluido es thixotrópico; si aumenta la viscosidad, el fluido es thixotrópico negativo. De este último tipo hay pocos ejemplos, pero abundan de los thixotrópicos, verbigracia: la margarina, determinadas pinturas, las cremas de afeitar y el catsup (una especie de salsa de tomate). La margarina, por ejemplo, tiene una elevada viscosidad que, en cambio, decrece cuando se extiende sobre una tostada. Si no se comportara de esta forma sería muy difícil extenderla.

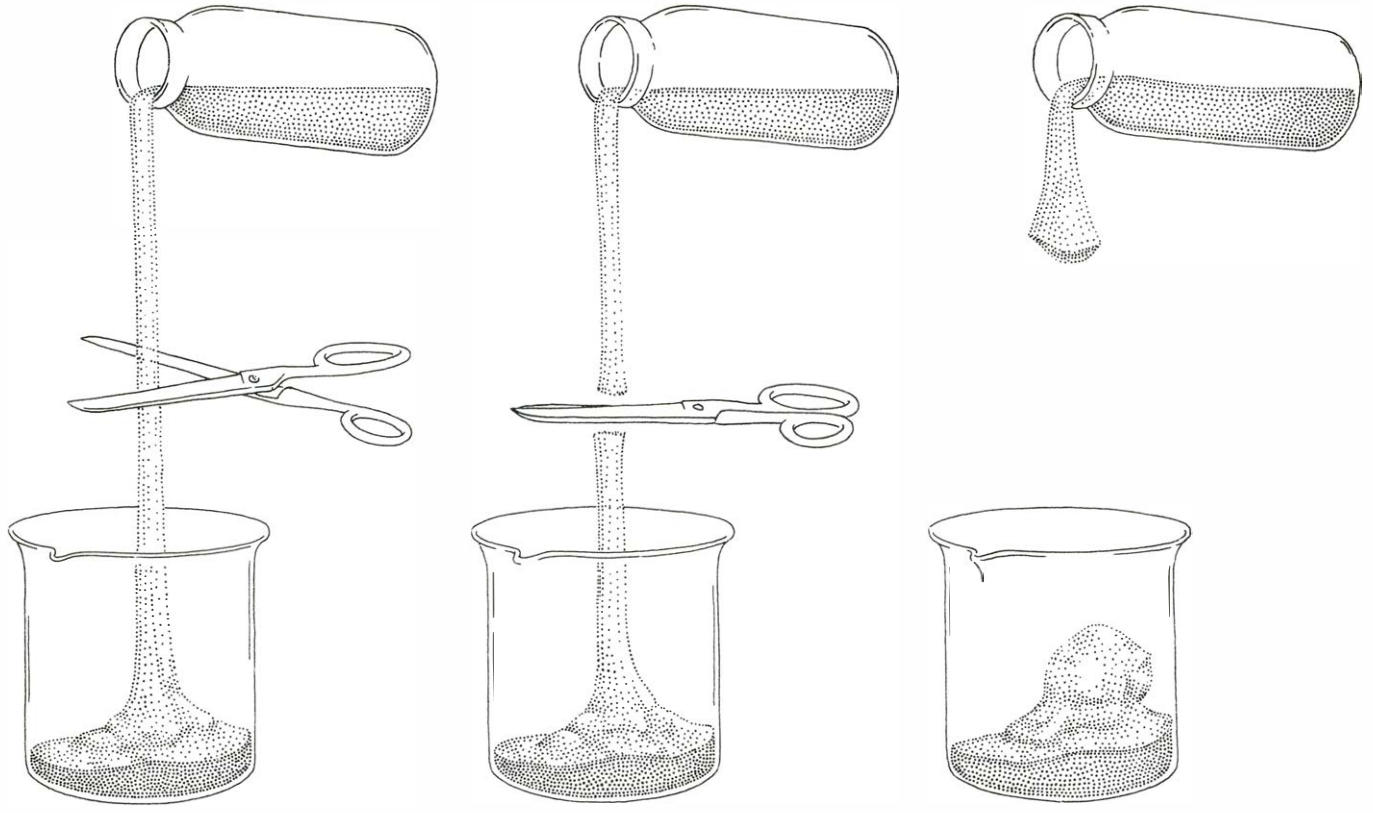
No hay ninguna teoría que explique el cambio en la viscosidad de todos los fluidos thixotrópicos. Si el fluido está compuesto por moléculas asimétricas o por partículas, la viscosidad puede decrecer cuando dichas partículas se alineen paralelamente a las líneas de corriente del fluido durante el batido. Este modelo difiere del de los fluidos seudoplásticos en que los enlaces entre las moléculas tardarían más tiempo en romperse o bien en que la resistencia de los enlaces sería variable en el fluido.

Para suspensiones de ciertas partículas, la arcilla por ejemplo, es preciso acudir a otras teorías. Su estructura inicial, antes de someterla al batido, podría considerarse como un gel en el cual las partículas suspendidas se mantienen en su sitio por una estructura ordenada, por fuerzas eléctricas entre las partículas o por capas de agua entre ellas. Con el batido, el gel se transforma en un sol (un fluido coloidal menos denso) conforme se destruyen algunas estructuras. Si el fluido thixotrópico está compuesto por polímeros, puede suponerse de nuevo que el alineamiento a lo largo de las líneas de corriente es el primer responsable del cambio en la viscosidad. En suma, que el batido puede desenrollar, desenredar y alargar los polímeros para rebajar la viscosidad. Los fluidos negativamente thixotrópicos pueden explicarse a través de una hipótesis según la cual el número de enlaces intermoleculares aumenta durante el movimiento, por lo que la viscosidad incrementaría a medida que el fluido se fuera transformando en gel.

El catsup puede servir para experimentar con un fluido thixotrópico. Si se agita durante unos minutos, su viscosidad decrece, e incluso puede convertirse en un líquido muy fluido. Quizá se haya dado cuenta el lector de ese detalle si ha vertido catsup embotellado después de haber sacudido el envase con energía.

Yo mismo probé la naturaleza thixotrópica del catsup de una manera muy simple: llené un recipiente con esta salsa, la dejé reposar durante cinco minutos, después eché sobre ella bolitas de acero y cronometré el tiempo que tardaban en llegar al fondo. Dado que no podía ver a través del catsup, coloqué el recipiente sobre una lámina de plástico transparente puesta sobre un soporte redondo. A través del plástico podía ver cuándo alcanzaban las bolas el fondo, bolas que iba echando de cinco en cinco minutos.

Después de haber cronometrado cinco caídas, introduje una variación, revolvía el catsup durante un minuto justo antes de echar la bolita. El tiempo medio de caída sin agitarlo era de 27 segundos; moviéndolo era de 13. El hecho de revolverlo hacía disminuir la velocidad y ésta no se recuperaba hasta varios minutos después de haber dejado de remover.



Retroceso elástico de una corriente de fluido que ha sufrido un corte

El tercer tipo general de fluidos no newtonianos de los que hablaré incluye algunos que además de ser bastante viscosos, se muestran elásticos. Ejemplos de este tipo de fluidos son: masilla de silicio, aditivo STP para tratamiento de aceites, algunas sopas concentradas, ciertos aceites lubricantes y la parte espesa de la clara de huevo. La elasticidad se debe, en general, al enrollamiento de los polímeros en el fluido. La ruptura y la tensión pueden comprimir o extender estas moléculas de cadena larga, las cuales se comportan entonces como muelles.

La masilla de silicio, que es como ya se ha dicho un fluido viscoelástico, deriva del aceite de la dimetil-silicona (las instrucciones para hacerlo en el laboratorio se publicaron en el *Journal of Chemical Education*, vol. 50, 1973, pág. 434). Esta sustancia tiene tres tipos interesantes de tensión y ruptura. Si se cizalla lentamente, la masilla fluye como un líquido muy viscoso; si se cuelga de una varilla, irá cayendo poco a poco. Sin embargo, si se cizalla más de prisa, la masilla actuará como una pelota de goma. Si hacemos con ella una bola, la podremos botar en el suelo; su capacidad para recuperar la elasticidad es bastante alta. Al cizallar más de prisa esta masilla apenas si tiene elasticidad. Si tiramos vigorosamente de un trozo, se rompe como si fuera una varilla metálica que se torciera con violencia.

Aparecerá otra característica interesante de ciertos líquidos elásticos si introducimos cierta cantidad de masilla de silicio dentro de un tubo y la extraemos por el extremo opuesto del mismo. Cuando ésta sale del tubo, se expande en lo que se ha llamado "hinchazón muerta". Esta expansión constituye un inconveniente para la fabricación de fibras sintéticas; éstas manifiestan esa misma expansión cuando se hilan a la salida de un orificio, porque éste debe diseñarse para permitir la hinchazón y así poder dar a la fibra el tamaño y la forma deseados. Esta expansión se demuestra también con una solución de Polyox que tenga una concentración de un uno por ciento.

El hinchamiento parece estar causado por un súbio rechazo de la cizalladura y a la tensión a que está sometido el fluido cuando se le obliga a pasar a través del tubo y por la abertura de salida. En el tubo, las moléculas de cadena larga se contraen ante la fuerza del empuje. Cuando salen del tubo se expanden de repente para aliviar la tensión interna. Si se deja la masilla en el tubo, durante un rato, antes de hacerla salir por el extremo, no se expande tanto. En esas condiciones, la tensión se alivia por alguna otra razón.

El retroceso elástico puede observarse también en soluciones de Polyox agitadas y en sopas concentradas. Para el Polyox, Collyer recomienda una solución al 2,5 por ciento. Yo mismo hice un experimento con una solución diluida de sopa de tomate Campbell, siguiendo una sugerencia de Peter Murphy, del Centre College de Kentucky, quien me había advertido del efecto. El experimento se desarrolló así: añadí un bote de agua a otro bote de sopa concentrada. Agité lentamente la solución con una cuchara y la saqué. Cuando el remolino estaba a punto de pararse, cambió la dirección del movimiento. Esta inversión del movimiento constituye un rechazo contra las tensiones y rupturas creadas por el remolino en el fluido elástico.

Algunos fluidos elásticos pueden autoexpulsarse de un recipiente una vez que se ha iniciado una corriente descendente (efecto llamado de autosifón). Para esta demostración Collyer recomienda una solución de Polyox al 8 por ciento. El fluido es lo suficientemente elástico como para que una vez que se tiene una buena cantidad de éste colgando del borde de un recipiente en alto, la parte que cuelga subirá la mayor parte del fluido del recipiente al borde y después se desbordará por el lateral. Se puede cambiar la dirección del fluido disminuyendo la longitud del líquido colgante. Por ejemplo, se puede hacer que el líquido que cuelga caiga a otro recipiente y después elevar lentamente al segundo recipiente para hacer decrecer la longitud de fluido entre los dos.

Se puede descubrir una tendencia similar a la elevación si se succiona Polyox de un recipiente con una jeringa hipodérmica. Primero se sumerge la jeringuilla en la superficie del líquido y luego, a medida que se va tirando del émbolo, se va levantando la jeringa. El fluido sigue ascendiendo dentro de la jeringa aun cuando se haya levantado la aguja de 5 a 10 centímetros por encima de la superficie de Polyox del recipiente. El líquido se mueve a lo largo de la superficie, alcanza la delgada corriente hacia la jeringa, sube y entra dentro de ésta.

Con unas tijeras se puede cortar una corriente descendente de solución de Polyox al 2,5 por ciento. Para ello hay que frotar primero las mismas con vaselina para evitar que se pegue; luego se corta la corriente por unos centímetros más abajo del borde del recipiente del que se está vertiendo el fluido. Una vez que se ha dado el corte, la parte alta de la corriente se recoge hacia arriba y vuelve al recipiente.

Este efecto puede demostrarse también con Slime, un nuevo juguete que acaba de aparecer en Estados Unidos. Se trata de un fluido verde viscoelástico que muestra hinchamiento y autosifón; puede cortarse y tiene contracción elástica. Se parece a la masilla de silicio, pues presenta tres tipos distintos de respuesta al cizallamiento y a la tensión interior. Si se cizalla poco a poco, fluye como un líquido de gran viscosidad, pero si se cizalla de prisa se contrae como una superficie de goma y, si se hace con violencia, se rompe.

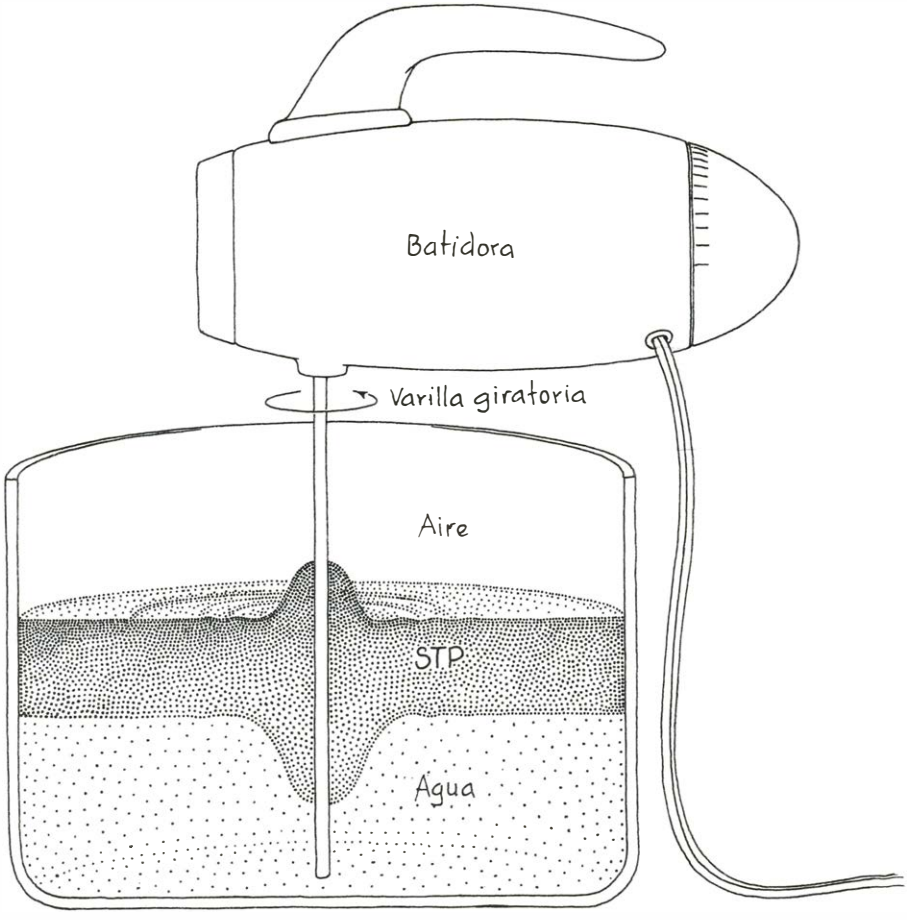
Observaremos dos reacciones de éstas dejando caer una bola de acero en la superficie del Slime. La bola entra ligeramente en la superficie, haciendo que ésta oscile como lo haría una superficie de goma. La bola se hunde luego con suavidad en la superficie y baja al fondo del Slime. Esta sustancia, que puede adquirirse en la mayoría de las tiendas de juguetes, es probablemente una solución polímera muy similar a la de Polyox. El fluido resulta casi irresistible para los niños y para los adultos, debido quizás a que el tacto y comportamiento de un fluido viscoelástico son muy distintos del tacto y viscosidad que uno se imagina.

Uno de los efectos más extraños de algunos fluidos elásticos es su respuesta cuando se agitan con una varilla central giratoria. La fuerza centrífuga podría determinar que, en un fluido normal movido así, se formara una superficie cóncava con su punto más bajo en el centro del recipiente. Cuando se agita de este modo un determinado fluido elástico, ocurre justo lo contrario: se desplaza hacia el centro y asciende por la varilla formando el llamado "efecto Weissenberg" (en honor de K. Weissenberg, quien estudió este fenómeno en los años 40). Hay varios fluidos que manifiestan este comportamiento: la gelatina, algunas marcas de leche condensada, ciertos tipos de miel (la de brezo), el aditivo STP para tratamiento de aceite, algunos tipos de aceite, Polyox y la parte espesa de la clara de huevo. Para el Polyox, Collyer recomienda una solución al 2,5 por ciento.

Después de mezclar la gelatina con agua caliente a una temperatura de unos 54 grados centígrados, 130 Fahrenheit, el fluido resultante fue newtoniano hasta que adquirió una temperatura de 30 grados (86 Fahrenheit). A partir de entonces, y hasta convertirse en gel a los 28 grados centígrados, la tendencia ascendente de la mezcla aumentó a medida que la temperatura disminuía.

¿Por qué se comporta de una manera tan extraña un fluido viscoelástico? Cuando se vierte en una dirección, su estructura provoca la aparición de fuerzas perpendicularmente adicionales. En el efecto Weissenberg, la fractura que produce la varilla giratoria origina una fuerza radial hacia dentro, en torno a la varilla, empujando el fluido hacia ésta y obligándole a que ascienda por ella. Cuanto mayor sea el índice de ruptura, mayor será la fuerza radial hacia dentro y el líquido subirá más. La superficie puede tomarse como un sistema de bandas elásticas concéntricas. Cuando éstas giran a velocidades diferentes, a causa de la viscosidad del fluido, crean fuerzas de rompimiento entre ellas, las cuales, a su vez, crean las fuerzas radiales que tratan de contraer las bandas elásticas hacia el centro.

Se obtienen los mismos resultados si en vez de girar la varilla lo hace el recipiente que contiene el fluido. De nuevo, las fuerzas opuestas en torno a la varilla central hacen que el líquido fluya hacia dentro. Si se sustituye la varilla por un tubo hueco, el fluido ascenderá a través del tubo y lo hará con mayor celeridad cuanto más rápido gire el recipiente. Si se coloca una hilera de tubos a lo largo del diámetro de la superficie del fluido, éste muestra claramente la tendencia ascendente; las alturas en el interior de los tubos van aumentando desde el borde hasta alcanzar el máximo en el tubo central. Este efecto se aprecia mejor si los tubos han sido sometidos a un vacío parcial. En algunas circunstancias, el objeto central puede ser un disco plano sostenido por una varilla central desde arriba. Si se baja primero el



Un efecto Weissenberg doble

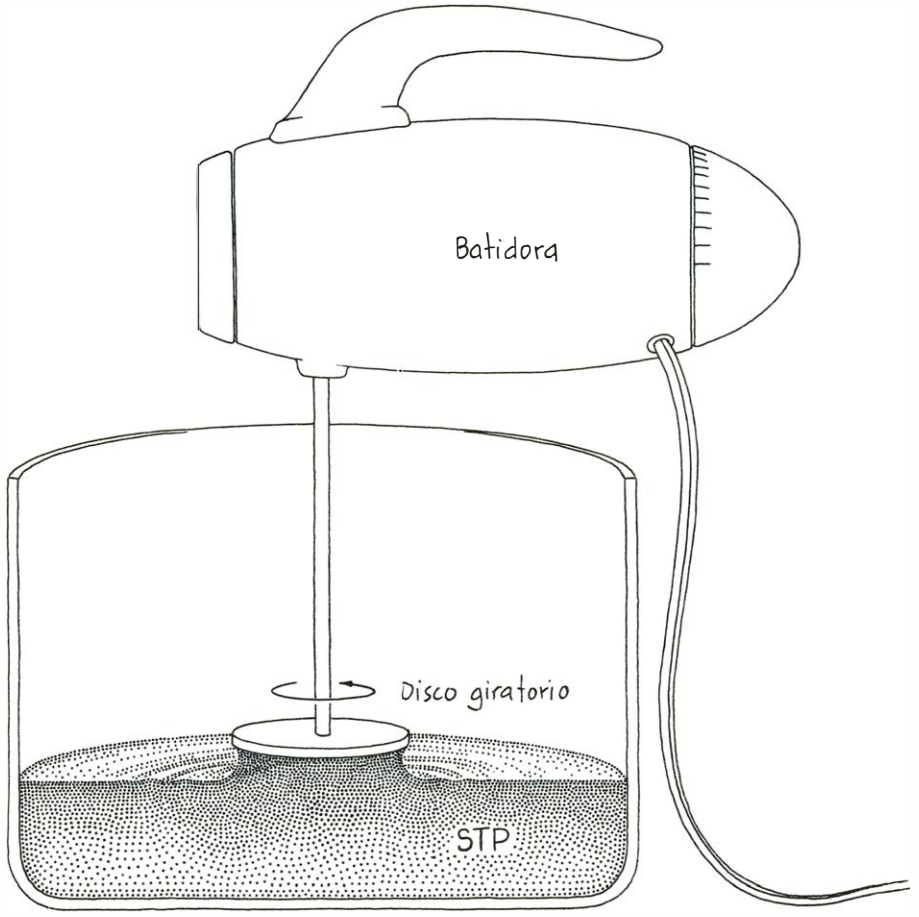
disco hasta la superficie del líquido giratorio y después se eleva lentamente puede hacer que el líquido se eleve bajo el mismo.

Gordon S. Beavers y Daniel D. Joseph, de la Universidad de Minnesota, publicaron recientemente en el *Journal of Fluid Mechanics* una nueva manera de conseguir el efecto Weissenberg en el aditivo STP para tratamiento de aceite. Para ello pusieron varios centímetros de este líquido sobre una capa de agua y agitaron ambas capas con una varilla central rotatoria. El fluido STP es viscoelástico y normalmente muestra el efecto Weissenberg; ahora bien, además de ascender por la varilla, descendía también por ésta dentro del agua. Dado que la gravedad ayudaba a impulsar el fluido STP hacia abajo, el pandeo descendente alrededor de la varilla era más pronunciado que el ascendente. Si se sustituye el agua por un fluido con una densidad afín a la del fluido STP, el pandeo inferior sería aún mayor.

Si el lector quiere producir el efecto Weissenberg, puede usar un cuenco montado sobre una mesa giratoria. Se podría poner también un recipiente pequeño sobre un taladro manual invertido. De preferirse una varilla central rotatoria, puede usarse una empalmada a un taladro eléctrico, pero hay que tener cuidado de no estropear el recipiente ni hacer saltar líquido al motor del taladro. Este accidente puede causar heridas graves e incluso la muerte.

Hice el experimento con una batidora de cocina corriente que tenía distintas velocidades. Con una sierra de metal corté las cuchillas de un batidor de suerte que quedara sólo la varilla central; luego repasé la varilla con una lima. Después de desarmar el otro batidor de la misma manera, pegué un disco plano al extremo del batidor, de forma que pudiera hacer el experimento del disco. Para controlar mejor la velocidad, conecté la batidora a un punto de potencial variable, de suerte que pudiera cambiar fácilmente el voltaje que le llegaba, pero dado que este procedimiento puede estropear algunas batidoras, no recomendaría usarlo por norma general.

Tras fracasar con ciertas marcas de leche y con otros fluidos envasados, probé con la clara de huevo; ésta mostró un ascenso notable con la batidora puesta a la velocidad máxima (para separar la clara de la yema se puede usar un simple utensilio que venden en las tiendas de artículos de cocina). El fluido STP dio buen resultado, ascendiendo y descendiendo de la forma descrita por Beavers y Joseph. Con la batidora a velocidad máxima, el ascenso fue de casi un centímetro.



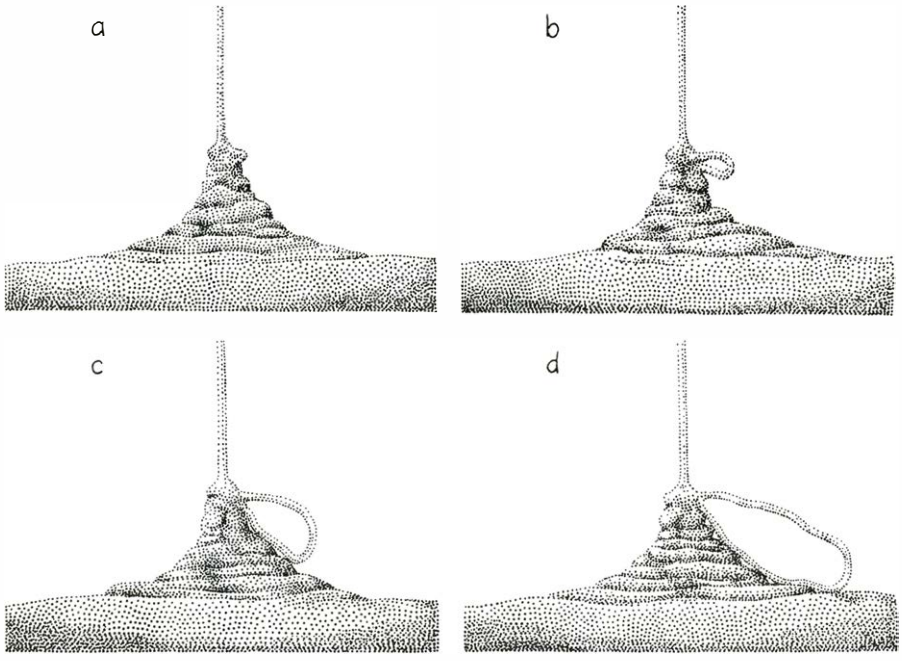
La demostración del disco giratorio

Para estudiar el efecto Weissenberg quizás el lector quiera probar con otros fluidos (distintos grados de aceite lubricante y diferentes tipos de fluidos elásticos, la miel por ejemplo). Algunos fluidos pueden sustituirse por STP y aceite en la demostración de la ascensión. El lector puede relacionar la profundidad del descenso con la diferencia de densidad de los dos fluidos. Se puede añadir encima un tercer fluido (que reemplace al aire). Sería interesante averiguar la relación existente entre la altura del ascenso y la velocidad de rotación y concentración del fluido en cualquiera de las demostraciones de Weissenberg.

En 1963, A. Kaye, actualmente en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Manchester, notó que cuando se vierte una solución viscoelástica de poliisobutileno en "decalina" desde una altura de 25 centímetros en un plato con el mismo fluido, brota de vez en cuando de éste un chorro fino que parte del punto donde cayó. Este efecto, que lleva el nombre de su descubridor, Kaye, ocurre de la siguiente manera. La corriente descendente crea primero una pequeña acumulación de fluido en el punto de impacto. Luego se desarrolla un pequeño chorro que fluye hacia fuera de la acumulación en una trayectoria baja, que algunas veces se hunde. El hecho de que el fluido saltara de esta forma no se entendía en un principio.

Collyer y P. J. Fisher afirmaron recientemente que la corriente ascendente es una curva del fluido. Explicaron este efecto Kaye tras examinar películas del chorro a gran velocidad y reducir su movimiento. La viscosidad de líquido es bastante alta y rígida, debido a que el fluido, en la acumulación inicial, se mueve con suavidad. A medida que desciende el fluido de la corriente, su índice de caída es lento y su viscosidad alta. Pero, al producirse el impacto, el índice de caída aumenta de repente y el fluido elástico se hace más fino al caer, de manera que puede rebotar si choca con la superficie rígida de la acumulación.

Collyer recomienda mezclar el poliisobutileno con la "decalina", cortando el primero en trozos pequeños antes de añadirlo al líquido. Después, hay que dejar cubierta la mezcla durante unas tres semanas para que se mezcle bien. Collyer me ha comunicado que el efecto Kaye se puede demostrar, sin tantas complicaciones, con ciertos tipos de champú, aunque el salto resulte menos abrupto.



Un líquido que salta mostrando el efecto Kaye

Los saltos duran un segundo más o menos, de manera que hay que estar mirando a la solución muy atentamente o hacerle fotografías de alta velocidad. Para crear los saltos debe ajustarse la altura del recipiente del champú, de forma que la corriente que salga de éste sea un tanto estrecha. Dentro de un cierto rango crítico de caída, la corriente saltará por sí misma.

Herr, de la Universidad de Nueva Orleans, recordaba haber visto más de dos arcos iris simultáneos, quizás incluso cuatro, en Malasia, donde se producen a menudo breves tormentas brillantemente iluminadas con luz directa del sol. Se dice que otros lugares, como Irlanda, reúnen condiciones favorables para la aparición de arcos iris brillantes, posiblemente con más de los dos primeros órdenes, debido a que muchos chaparrones están iluminados por luz solar directa. Estas observaciones serían improbables en lugares donde una tormenta significa normalmente que todo el cielo está cubierto antes y después de llover.

J. R. Prescott, de la Universidad de Adelaida, describió lo que podría haber sido el de tercer orden bajo una circunstancia extraña. Como quedó demostrado en mi experimento del arco iris, el de tercer orden se sitúa en la porción del cielo próxima al sol y, por ello, se pierde normalmente debido a su brillo. Prescott observó, justo antes del ocaso, colores en forma de arco a través de la lluvia que caía de nubes muy obscuras, lo suficientemente altas, hacia el suroeste, como para que el sol se dejara ver bajo las mismas. Los colores se veían sobre un fondo obscuro, mientras que la lluvia estaba bien iluminada por un sol bajo. Si esta escena era realmente de un arco iris de tercer orden, ello significa que el arco iris se hace visible cuando el fondo es lo bastante obscuro como para evitar que la luz del fondo del cielo oculte los colores del mismo.

Quizás al lector le guste buscar cuidadosamente una situación similar de las nubes, la lluvia y el sol. Si se fotografiara el arco de color, por las medidas de su espesor podría verificarse si el arco era realmente un arco iris o un halo de color o cualquier otro efecto óptico atmosférico, originado por cristales de hielo. Hay que tener cuidado en no confundir los arcos iris del quinto y sexto órdenes, que se extienden cerca de los dos primeros, con arcos supernumerarios bien desarrollados de los arcos iris primario y secundario. Si se consigue fotografiar un auténtico arco iris de un orden más alto, sería la primera fotografía conocida de otro orden que no fuera uno de los dos primeros.

Varios grupos han trabajado con el arco iris de gotas suspendidas descrito en mi artículo. Steve Lai, de Portland, observó varios arcos iris de orden superior. Para ver arcos iris de los órdenes décimo y catorceavo, cosa que requiere mirar casi a lo largo del rayo incidente, Lai utilizó un pequeño espejo de dentista a fin de reflejar la imagen de las gotas y los arcos iris manteniendo así su cabeza fuera del rayo incidente.

En la Feria Internacional de la Ciencia y la Ingeniería de este año, Joseph E. Becker, de Spokane (Washington), me mostró su trabajo que consistía en determinar de forma experimental una función por la cual pueda calcularse el ángulo de un arco iris de cualquier orden para un fluido de cualquier índice de refracción. Otras tres muestras de la feria versaban sobre temas tratados en esta sección. El fenómeno de Leidenfrost (octubre de 1977), sobre gotas de fluidos que flotan en una capa fina de vapor sobre un plato caliente, fue investigado por Jerry Ritter, Jr, de Cloudcroft, (Nuevo México) y por Stuart A. Travis de Akron (Colorado). Ritter estaba interesado en ver cómo cambia el punto de Leidenfrost cuando el agua está contaminada con varias sustancias y cómo la medida del punto de Leidenfrost puede servir para indicar la cantidad de contaminación. Travis midió los puntos de Leidenfrost del agua destilada (a 400 grados F) y acetona (a 330 grados F) y tuvo la buena suerte de fotografiar las gotas flotantes con una lente de 55 milímetros y una ampliadora de 6 aumentos.

Peter Rathmann, de Brookfield (Wisconsin), hizo un análisis impresionante de un oscilador de sal (diciembre de 1977) en el que determinó la frecuencia del oscilador en función del tamaño del agujero, tiempo de recorrido, diferencia de densidades entre el agua salada y la dulce y otros factores. Descubrió que, para el rango de agujeros suficientemente pequeños como para permitir que el sistema oscilase, la frecuencia de oscilación aumentaba en una proporción casi lineal según el tamaño del agujero. También demostró que la frecuencia disminuía a medida que el experimento llevaba más tiempo en práctica, resultado que interpretó como indicador de que a medida que el experimento transcurría, la diferencia de densidad entre los dos fluidos en el oscilador decrecía debido a la mezcla y, como consecuencia, la fuerza que impulsaba las oscilaciones se debilitaba.

Rathmann y J. E. Schmidt, de Charlestown (Indiana), han señalado de forma independiente que en mi artículo debía haber dado mayor relevancia a la naturaleza de péndulo del oscilador de sal. Una vez que el fluido empieza a correr, no se detiene cuando las presiones en el agujero se igualan, porque el fluido tiene fuerza y el sistema va más allá de su estado de equilibrio. En cuanto la corriente se para, el sistema vuelve otra vez a encontrarse con presión desigual alrededor del agujero, y el fluido empieza a correr en la dirección opuesta, rompiendo de nuevo el equilibrio y disminuyendo la velocidad hasta detenerse y volver a empezar. La inestabilidad de Rayleigh que describí en aquel artículo se exigía para mantener el oscilador en marcha: la viscosidad de los fluidos tiende a frenar el impulso de las corrientes. Si no fuera así, las oscilaciones de tipo pendular del sistema desaparecerían muy pronto.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ENERGIA DE FUSION CON HACES DE PARTICULAS

ELECTRON BEAM FOCUSING AND APPLICATION TO PULSED FUSION. G. Yonas, J. W. Poukey, K. R. Prestwich, J. R. Freeman, A. J. Toepfer y M. J. Clauser en *Nuclear Fusion*, vol. 14, n.º 5, págs. 731-740; 1974.

FOCUSED INTENSE ION BEAMS USING SELF-PINCHED RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS. Shyke A. Goldstein y Roswell Lee en *Physical Review Letters*, vol. 35, págs. 1079-1082; 20 de octubre de 1975.

PROPAGATION OF PINCHED ELECTRON BEAMS FOR PELLET FUSION. P. A. Miller, R. I. Butler, M. Cowan, J. R. Freeman, J. W. Poukey, T. P. Wright y G. Yonas en *Physical Review Letters*, vol. 39, n.º 2, págs. 92-98; 11 julio, 1977.

EL ENSAMBLAJE DE UN VIRUS

THE STRUCTURE OF THE PROTEIN DISK OF TOBACCO MOSAIC VIRUS TO 5 Å RESOLUTION. J. N. Champness, A. C. Bloomer, G. Bricogne, P. J. G. Butler y A Klug en *Nature*, vol. 259, págs. 20-24; 1 y 8 de enero de 1976.

TOBACCO MOSAIC VIRUS PROTEIN AGGREGATION AND THE VIRUS ASSEMBLY. P. Jonathan G. Butler y Anthony C. H. Durham en *Advances in Protein Chemistry*, vol. 31, págs. 187-251, 1977.

CONFIGURATION OF TOBACCO MOSAIC VIRUS DURING VIRUS ASSEMBLY. J. T. Finch y D. Zimmern en *Nature*, vol. 265, págs. 217-219; 20 de enero de 1977.

THE ISOLATION OF TOBACCO MOSAIC VIRUS RNA FRAGMENTS CONTAINING THE ORIGIN FOR VIRAL ASSEMBLY. David Zimmern y P. J. G. Butler en *Cell*, vol. 11, págs. 455-462; julio, 1977.

LA OPTICA DE RAYOS X DE LONGITUD DE ONDA LARGA

X-RAY MICROSCOPY IN CLINICAL AND EXPERIMENTAL MEDICINE. T. A. Hall, H. O. E. Röckert, R. L. de C. H. Saunders. Charles C Thomas, Publisher, 1972.

HIGH-RESOLUTION PATTERN REPLICATION USING SOFT X RAYS. D. L. Spears y Henry I. Smith en *Electronics Letters*, vol. 8, n.º 4, págs. 102-104; febrero, 1972.

S056 X-RAY TELESCOPE EXPERIMENT ON THE SKYLAB APOLLO TELESCOPE MOUNT. J. H. Underwood, J. E. Milligan, A. C. DeLoach y R. B. Hoover en *Applied Optics*, vol. 16, n.º 4, págs. 858-869; abril, 1977.

MOSAICOS ROMANOS DE MERIDA

INFORME SOBRE LAS CASAS ROMANAS DE MERIDA Y EXCAVACIONES EN LA CASA DEL ANFITEATRO. E. García Sandoval, Madrid, 1966.

AUGUSTA EMERITA. ACTAS DEL SIMPOSIO INTERNACIONAL CONMEMORATIVO DEL BIMILENARIO DE MERIDA. Madrid, Ministerio de Educación y Ciencia, 1976.

LA VILLA ROMANA DE EL HINOJAL EN LA DEHESA DE LAS TIENDAS (MERIDA). José M.ª Alvarez, en *Noticiario Arqueológico Hispánico IV*, Madrid, 1976, 433 y ss.

CORPUS DE MOSAICOS ROMANOS DE ESPAÑA. FASCICULO I. MOSAICOS ROMANOS DE MERIDA. Antonio Blanco Freijeiro, Madrid, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1978.

CUMULOS RICOS DE GALAXIAS

CLUSTERING OF GALAXIES. George O. Abell en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 3, dirigido por Leo Goldberg, Armin J. Deutsch y David Layzer, Annual Reviews, Inc., 1965.

THE STRUCTURE OF ELLIPTICAL AND CD GALAXIES. Augustus Oemler en *The Astrophysical Journal*, vol. 209, n.º 3, Parte 1, págs. 693-709, 1 de noviembre de 1976.

LOS MECANISMOS DEL MECANIZADO POR ABRASION

THE ABRASION OF METALS: A MODEL OF THE PROCESS. T. O. Mulhearn y L. E. Samuels en *Wear*, vol. 5, n.º 6, págs. 478-498; noviembre/diciembre, 1962.

MECHANISM OF ABRASIVE POLISHING. R. L. Aghan y L. E. Samuels en *Wear*, vol. 16, n.º 4, págs. 293-301; octubre, 1970.

ABRASIVES. L. Coes, Jr. Springer-Verlag, 1971.

EL SISTEMA DE RECOMPENSA DEL CEREBRO

THE ORGANIZATION OF THE ASCENDING CATECHOLAMINE NEURON SYSTEMS IN THE RAT BRAIN AS REVEALED BY THE GLYOXYLIC ACID FLUORESCENCE METHOD. Olle Lindvall y Anders Björklund en *Acta Physiologica Scandinavica Supplementum 412*, págs. 1-48; 1974.

BRAIN STIMULATION REWARD. Albert Wauquier y Edmund T. Rolls. North-Holland Publishing Company, 1976.

DRIVES AND REINFORCEMENTS: BEHAVIORAL STUDIES OF HYPOTHALAMIC FUNCTIONS. James Olds. Raven Press, 1977.

THE ROLE OF PREFRONTAL CORTEX IN INTRACRANIAL SELF-STIMULATION. Aryeh Routtenberg y Rebecca Santos-Anderson en *Handbook of Psychopharmacology*: vol. 8, dirigido por Leslie L. Iversen, Susan D. Iversen y Solomon H. Snyder. Plenum Press, 1977.

EL SISTEMA DE CONTROL DE VUELO DE LOS HERMANOS WRIGHT

HOW WE INVENTED THE AIRPLANE. Orville Wright, dirigido por Fred C. Kelly. David McKay Co., Inc., 1953.

THE INVENTION OF THE AEROPLANE (1799-1909). Charles H. Gibbs-Smith. Faber and Faber, 1966.

JUEGOS MATEMATICOS

PACKING A BOX WITH Y-PENTACUBES. C. J. Bouwkamp y D. A. Klarner en *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 3, n.º 1, págs. 10-26; enero, 1970.

MAX BILL. Introducción de James Woods, texto de Lawrence Alloway. Buffalo Fine Arts Academy y Albright-Knox Art Gallery, Buffalo. 1974.

MAX BILL: SUPERB PURITAN. Robert Hughes en *Time*, vol. 104, págs. 100-101; 18 de noviembre de 1974.

ANNO 1968-1977. Mitsumasa Anno. Kodansha, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

DEMONSTRATIONS WITH VISCOELASTIC LIQUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 8, n.º 2, págs. 111-116; marzo, 1973.

TIME INDEPENDENT FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 8, n.º 5, págs. 333-338; julio, 1973.

TIME DEPENDENT FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 9, n.º 1, págs. 38-44; enero, 1974.

VISCOELASTIC FLUIDS. A. A. Collyer en *Physics Education*, vol. 9, n.º 5, págs. 313-321; julio, 1974.

Taller y laboratorio

El efecto Moiré, el caleidoscopio y otros juguetes ópticos de la época victoriana

Jearl Walker

Este mes vamos a hablar acerca de unos clásicos juguetes ópticos que aparecieron en el siglo pasado. Aunque algunos de ellos todavía se venden, la mayoría han caído en desuso, víctimas de los nuevos entretenimientos, pero resultan tan divertidos e instructivos que merecían haber tenido mejor suerte.

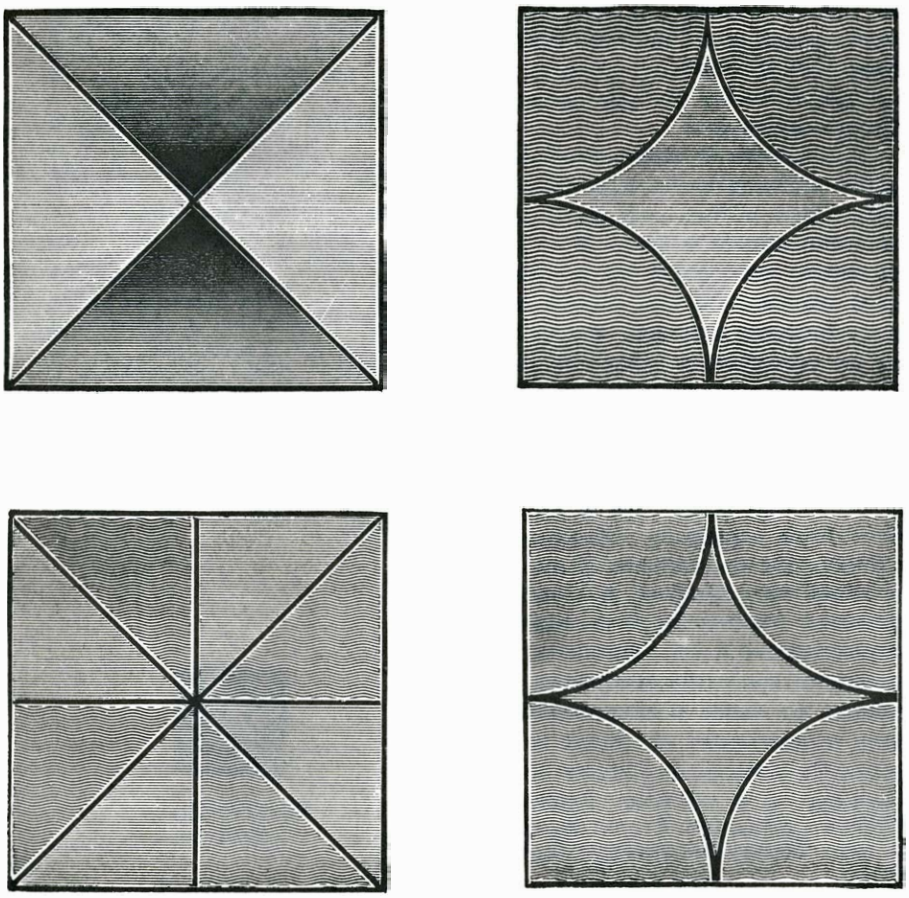
Uno de los juguetes ópticos más simples es el que ahora se llama "figuras moiré" (moiré patterns). Está basado en el efecto tremulante que se observa al mirar dibujos de figuras regulares, colocados unos sobre otros de manera que, en algunos sitios, las figuras coinciden (están en fase) y en otros no (están desfasadas). Se puede llevar a cabo una sencilla demostración de este efecto con un peine. Para ello se debe mantener éste paralelo a un espejo, de suerte que el observador pueda mirar a través de las púas y ver la imagen del peine en dicho espejo. Si el peine se coloca a una distancia adecuada con respecto al espejo, algunas púas de la imagen coincidirán con las reales en el campo de visión del observador. Por el contrario, otras púas estarán desfasadas con respecto a las reales. Lo que se ve es una configuración repetida a lo largo del peine que será obscura en las zonas en las que las púas reales no coincidan (estén desfasadas) con las de la imagen. Si se mueve el peine paralelamente al espejo, se podrá observar cómo las zonas obscuras (suponiendo que el peine sea obscuro) corren a lo largo del peine con un movimieto ondulatorio.

Este tipo de movimiento se empleó en dibujos publicados en el siglo XIX. Sobre un dibujo en blanco y negro se juntaron muchas líneas paralelas muy próximas unas de otras. Se pedía al lector que colocara sobre el dibujo un filtro, al que también se le habían pintado una serie uniforme de líneas paralelas. No estoy seguro de qué material estaba hecho el filtro, pero probablemente sería de cristal o algún tipo de papel transparente. Cuando el observador movía lentamente el filtro sobre el dibujo, la configuración rayada que originaba el conjunto de las líneas del filtro y la ilustración del dibujo, también rayada, daban la impresión de que los objetos del dibujo se estaban moviendo.

Dover Publications ha reimpreso (bajo el título de *The Magic Moving Picture Book*) un libro que se publicó por primera vez en Londres en 1898 con el título de *The Motograph Moving Picture Book*. El filtro transparente es de acetato y está rayado con una serie de líneas paralelas muy unidas. Los dibujos comprenden una serie de diseños geométricos, una representación de un volcán en erupción y una escena de un bombero apagando un incendio. Si movemos el filtro sobre el dibujo del bombero, por ejemplo, el movimiento de la configuración rayada hace que el fuego pierda fulgor, que aumente el humo y que el agua corra sobre el pavimento de la calle. En otras ilustraciones el efecto del rayado parece hacer que giren unas ruedas y el agua ondule en torno a un barco.

Se puede fabricar, con los propios medios, un duplicado de este efecto. Para ello se debe dibujar sobre una hoja de papel una figura geométrica con muchas líneas paralelas, separadas uniformemente. A continuación, se raya de forma similar, con líneas análogamente separadas, una lámina de acetato transparente. El plástico de acetato se puede adquirir en cualquier tienda de artículos de pintura artística, en donde también puede comprarse el tipo de tinta adecuado para dibujar sobre el plástico.

Una vez que la tinta se haya secado, se coloca el filtro sobre el dibujo y se mueve lentamente sobre él, de manera que las rayas del filtro y las del dibujo permanezcan paralelas. La configuración del dibujo se moverá de forma ondulante. Se pueden conseguir diversas variaciones en el juego. Para ello hay que trazar las líneas sobre el dibujo ligeramente más separadas o más juntas que las del filtro, o bien hacerlas onduladas en lugar de rectas. También se puede ensayar a orientar las líneas del dibujo con diversos ángulos con respecto a las líneas del plástico y realizar figuras compuestas de áreas con distintas orientaciones de las líneas. Por último, también se pueden dibujar escenas en las que sólo se muevan las zonas que interese.



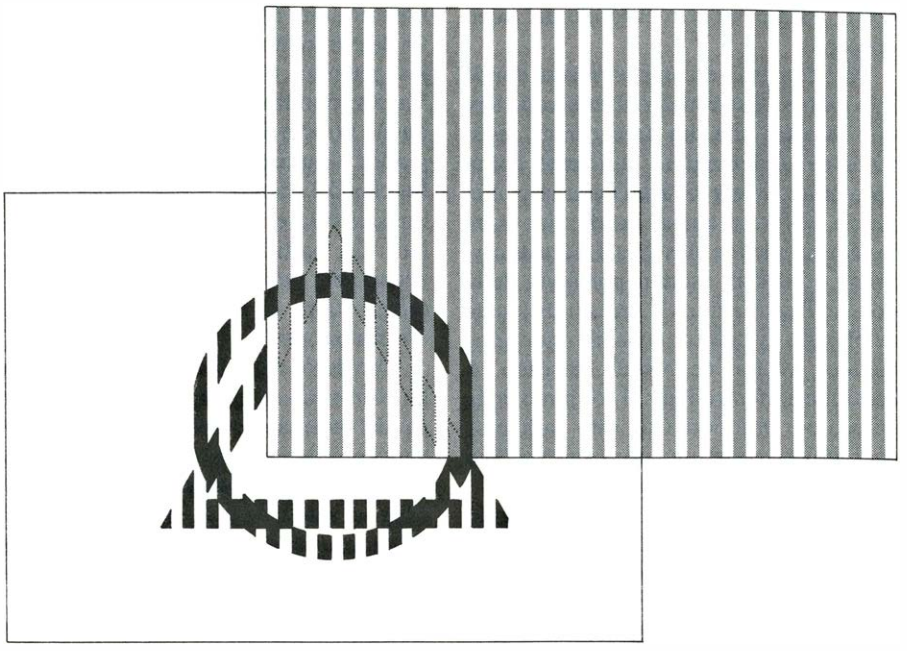
Diseños que pueden dar lugar al efecto moiré

Recientemente se ha utilizado un juguete similar por una cadena de supermercados de alimentación para promocionar una bebida. El juguete, ahora bajo patente a nombre de la empresa "Magic, Magic, Magic, Unlimited", consistía en dos tazas de plástico colocadas una dentro de la otra y que podían girar independientemente. La taza exterior, de plástico transparente, tenía una zona rayada con líneas negras verticales. La taza del interior era opaca y llevaba dos dibujos superpuestos alternándose uno con otro en espacios verticales del mismo ancho que las líneas que estaban pintadas en la taza exterior.

Con la taza interior en una determinada posición, las rayas negras verticales de la taza exterior tapaban las zonas verticales correspondientes a uno de los dibujos y dejaban ver, por el contrario, todas las partes correspondientes al otro dibujo. Desde una distancia de 30 centímetros más o menos, el observador ve el dibujo casi completo; las zonas negras son aparentemente ignoradas debido a que mentalmente se completa la figura rellenando los espacios ocultos por las líneas. Rotando la taza del interior se sustituyen las zonas visibles de uno de los dibujos por los del otro. Si se continúa rotando lentamente se van alternando una con otra las zonas visibles de los dos dibujos. En mi taza, un jugador de béisbol se encorvaba para detener una pelota o bien estaba de pie. Al girar la taza interior parecía alternarse entre las dos posturas.

La época victoriana se divertía con una gran variedad de juegos de dibujos intercambiables. El más simple de todos no consistía más que en un cuadro que tenía varias aberturas a través de las cuales podían deslizarse trozos del otro dibujo que iba a servir de alternativa. El movimiento cobraba mayor viveza cuando los dibujitos se hacían sobre dos plaquitas superpuestas que luego se proyectaban en la "linterna mágica", es decir, en lo que hoy llamamos proyector de diapositivas. El dibujo básico estaba pintado en una plaquita de cristal; la otra placa podía deslizarse frente a la primera. La segunda plaquita llevaba los elementos del dibujo compuesto que debían moverse. Cuando la "linterna mágica" proyectaba las dos plaquitas superpuestas, el operador sólo tenía que deslizar la segunda plaquita sobre la primera para conseguir dar el efecto de movimiento en la proyección.

Uno mismo se puede fabricar este sistema con la mayoría de los proyectores de diapositivas actuales. En el libro *Making Victorian Kinetic Toys*, Philip y Caroline Freeman Sayer recomiendan usar las delgadas laminitas de cristal de las monturas de las diapositivas de 35 milímetros. Para ello se puede comprar una pintura translúcida que se adhiera bien al cristal y que no se degrade con el calor del proyector. Pintar la escena fija sobre una de las laminitas de cristal. Es posible que se necesite preparar la segunda laminita para que se deslice mejor: para ello hay que ponerle una especie de asa, pegándole, por ejemplo, un palillo de dientes. De esa manera, cuando las dos laminitas estén metidas en la corredera del proyector, se puede mover la segunda lámina tirando del asa.



Diseños mezclados

Otro de los juguetes ópticos victorianos, el caleidoscopio, sigue gozando de la aceptación popular. Fue inventado (o, por lo menos, patentado) en 1816 por David Brewster, muy conocido por sus trabajos en óptica clásica, en particular por el llamado ángulo de Brewster en la polarización de la luz por reflexión. Aunque hay muchos tipos de caleidoscopios, el diseño básico es un tubo que contiene dos espejos o dos piezas de metal pulido pegados uno al otro formando un ángulo de 45 grados y con los otros dos bordes pegados a lo largo de la pared longitudinal del tubo. En un extremo hay un compartimento con trocitos de cristal o de cualquier otro material coloreado y en el otro un pequeño agujero a través del cual puede mirarse al interior del tubo. Mirando por dicho agujerito ve sólo un sector circular de todo el conjunto de los trocitos de material coloreado, así como las reflexiones de dicha zona en los espejos. Cuando el tubo se gira, la configuración simétrica que habíamos visto se va cambiando conforme los trocitos de material van cayendo en otras posiciones.

Se pueden encontrar instrucciones para montar un caleidoscopio casero en el excelente libro de Carson I. A. Ritchie, *Making Scientific Toys*. Lo primero que hay que hacer es recortar el fondo de una botella de plástico suficientemente larga y de las que tienen un gollete estrecho. La botella servirá como tubo y el gollete como apertura a través de la cual miraremos. Dentro del tubo se colocan dos espejos rectangulares con sus bordes formando un ángulo entre 40 y 70 grados. La botella deberá ser como un centímetro más larga que los espejos una vez que éstos se hallen colocados en su interior.

Colocar el fondo de la botella, una vez recortada, sobre una lámina de plexiglás de 3 milímetros de espesor y dibujar en ella la circunferencia de la botella. Hecho esto, se recorta el círculo de plexiglás trazado y se liman los bordes hasta que la pieza obtenida se ajuste perfectamente dentro de la botella.

La unión en bisagra de los dos espejos se debe reforzar con cinta adhesiva. Luego se pondrá la pieza de plexiglás recortada sobre una mesa, se situará sobre ella perpendicularmente el conjunto de los dos espejos y se fijarán al plexiglás con pegamento, pero colocando además un trocito de madera, con idea de mantener fijo el ángulo entre los espejos. Se obtendrán mejores resultados si se colocan los espejos de manera que los dos bordes de cada uno de ellos lleguen a tocar la circunferencia del círculo de plástico. Cuando el pegamento empleado se haya secado, introdúzcase el conjunto en la botella tan profundo como sea posible, pero de manera que lo último a introducir sea el extremo con el redondel de plástico. Ahora haga otro círculo de plexiglás indéntico al anterior pero, para que no sea transparente y sí translúcido, ráspelo con virutas de

acero. Esta pieza será el fondo del caleidoscopio.

Para construir el compartimento donde irán los trocitos de material coloreado hay que recortar una tira de cartulina resistente de una longitud suficiente como para amoldarse a lo largo de la circunferencia de forma que se pueda fijar entre los dos círculos de plexiglás. La tira de cartulina no deberá asomar por fuera de la botella. Pegar la tira a la pieza translúcida de plexiglás y colocar en su interior unos cuantos trocitos de cristal coloreado. A continuación introducir el conjunto en la botella por el fondo. Con esto ya hemos conseguido construir un caleidoscopio con un muestrario intercambiable.

Para investigar cómo influye el ángulo de los espejos quizá sea preferible trabajar con un montaje más simple. A tal fin se puede hacer un dibujo geométrico en un papel y situar sobre el mismo perpendicularmente dos espejos colocados formando ángulo y mirar el dibujo anterior por la abertura que dejan los dos espejos. Para un determinado ángulo entre los dos espejos, ¿cuántos sectores circulares se ven? Vaya variando el ángulo desde el más pequeño posible hasta prácticamente los 90 grados y anote el número de imágenes en función del ángulo. ¿Tienen todos los sectores circulares la misma anchura angular? En particular, ¿el sector circular situado por detrás de la bisagra de los dos espejos tiene el mismo tamaño que las otras secciones?

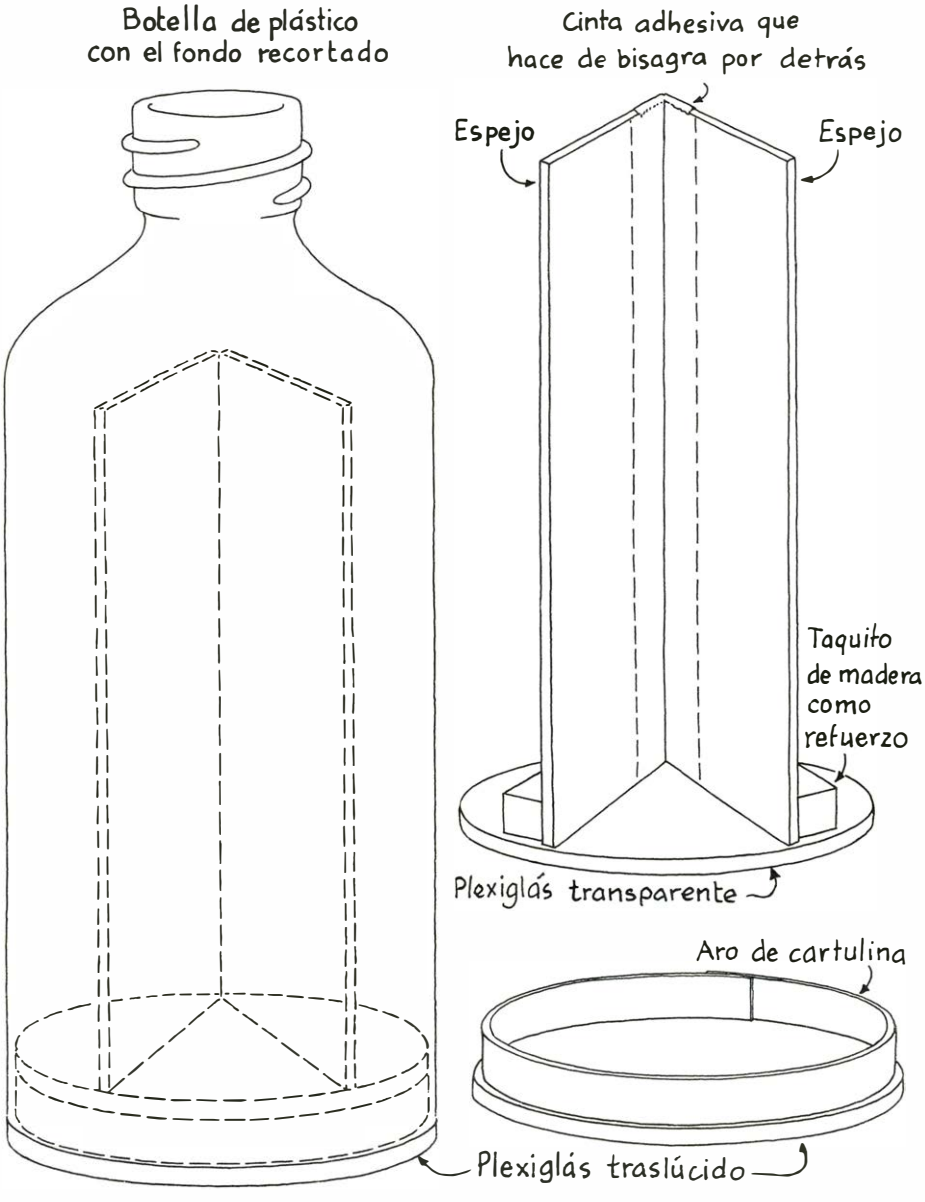
Uno de los mayores caleidoscopios que he visto tenía en el fondo una lente en lugar del receptáculo (creo que el aparato se llama propiamente teleidoscopio, pero no estoy seguro). La distancia focal de la lente debe ser menor que la longitud del tubo. Cuando se mire a través del aparato un objeto convenientemente separado, la lente reduce el tamaño de su imagen, de manera que se ven a la vez muchos objetos iguales. Para mí el efecto es maravilloso debido a que hay una mayor luz y un mayor colorido que en las típicas imágenes de un caleidoscopio convencional, donde los trocitos de cristal coloreados, así como el fondo translúcido, reducen la intensidad de la luz. Si se mira con el aparato un paisaje en movimiento, por ejemplo yendo en un coche, las constantes variaciones de las imágenes son casi sicodélicas.

Uno se puede fabricar un caleidoscopio de este tipo con una lente barata, un tubo de cartulina resistente y los dos típicos espejos. Elegir la lente y el tamaño del tubo de manera que el foco de la lente quede hacia la mitad del tubo. La abertura del extremo para mirar debe ser pequeña, pero lo suficientemente grande como para poder contemplar toda la imagen, incluyendo las reflexiones en los espejos.

Otra diversión, enormemente popular en el siglo pasado, consistía en mirar fotografías en estereoscope. Ritchie en su libro da normas acerca de cómo hacer una réplica de los viejos estereoscopios. En los anticuarios se pueden encontrar viejos aparatos de éstos y postales estereoscópicas, incluso se pueden comprar repeticiones de las mismas en el Stereo Classics Studio, Inc., 145 Algonquin Parkway, Whippany N.J. 07981. El tipo más común de estereoscopio tiene dos lentes, una para cada ojo, a través de las cuales el observador ve dos fotografías, una por cada ojo. Las fotos no son idénticas, sino que dan una perspectiva ligeramente diferente de la misma escena de manera que, al unirse las perspectivas de cada ojo, pueda verse la misma composición. Cuando las fotos se funden en el estereoscopio, se ve el original en tres dimensiones.

En su libro *Ready to Make Photo & Scene Machines*, Budd Wentz describe unos procedimientos muy sencillos para fabricar diferentes tipos de estereoscopios. El observador mira a través de una pieza de cartulina parecida a una máscara Halloween. Uno de los fines de la máscara es eliminar las distracciones de manera que uno se pueda concentrar en todos los detalles que le ayudarán a situar cada objeto de la fotografía en la profundidad que le corresponda.

En el centro de la máscara hay un trozo de cartón duro que tiene pegado un espejo plano. Se trata de ver una imagen directamente con un ojo mientras se ve una reflexión de la otra en el espejo con el otro ojo. Este sistema hace que los ojos converjan, lo cual, a su vez, ayuda al observador a dar profundidad a las figuras. Como ocurría antes, las dos figuras muestran perspectivas ligeramente diferentes; pero, además, una de ellas debe cambiarse de posición (volviéndola al revés) de manera que tenga la misma orientación que la otra después de la reflexión. Si se hace todo bien, el observador funde en una ambas



Diseño de Carson I. A. Ritchie de un caleidoscopio casero

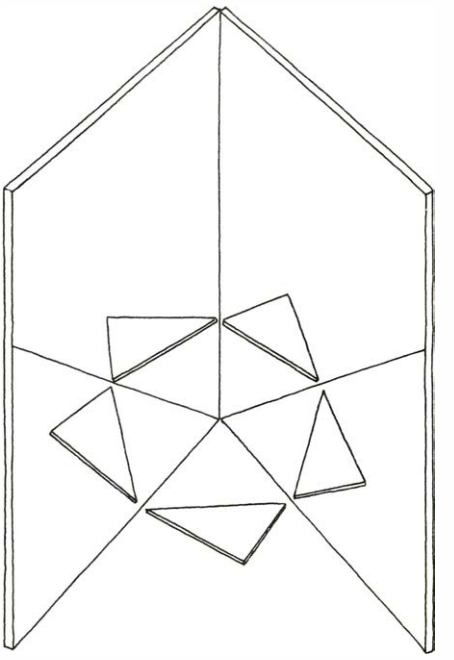
imágenes para obtener una sola tridimensional. Wentz proporciona reproducciones de algunas de las tarjetas estéreo que fueron populares con este tipo de aparato a finales del siglo XIX y principios del XX.

El estereoscopio corriente que se puede adquirir en las tiendas de antigüedades es diferente del de Wentz: tiene dos lentes en forma de prisma para facilitar la mezcla de las distintas imágenes que ve el observador. Ambas imágenes poseen la misma orientación, ya que no hay reflexión. Este tipo de estereoscopio parece que fue creado en 1859 por Oliver Wendell Holmes, basándose en parte en trabajos anteriores de Brewster. Las fotografías se hacían normalmente con una cámara provista de dos lentes, las cuales estaban separadas entre sí por una distancia aproximada a la separación media existente entre los ojos de una persona. Las distancias focales de las lentes en la cámara y en el estereoscopio eran las mismas, de manera que el observador veía la misma perspectiva que la cámara. También se podían hacer las fotos con una cámara ordinaria tomando primero una fotografía y moviendo luego la cámara siete u ocho centímetros hacia un lado para hacer la otra.

Thomas B. Greenslade, Jr., y Merritt W. Green III han publicado el resultado de sus experimentos con este tipo de estereoscopio y sus intentos de hacer fotografías para el mismo. Es posible que el lector quiera seguir sus pasos bien con un estereoscopio antiguo o con uno casero. Si el lector se construye uno en casa, Ritchie sugiere que se encarguen las lentes a un óptico. Se podría probar a utilizar en su lugar prismas de vidrio en forma de cuña.

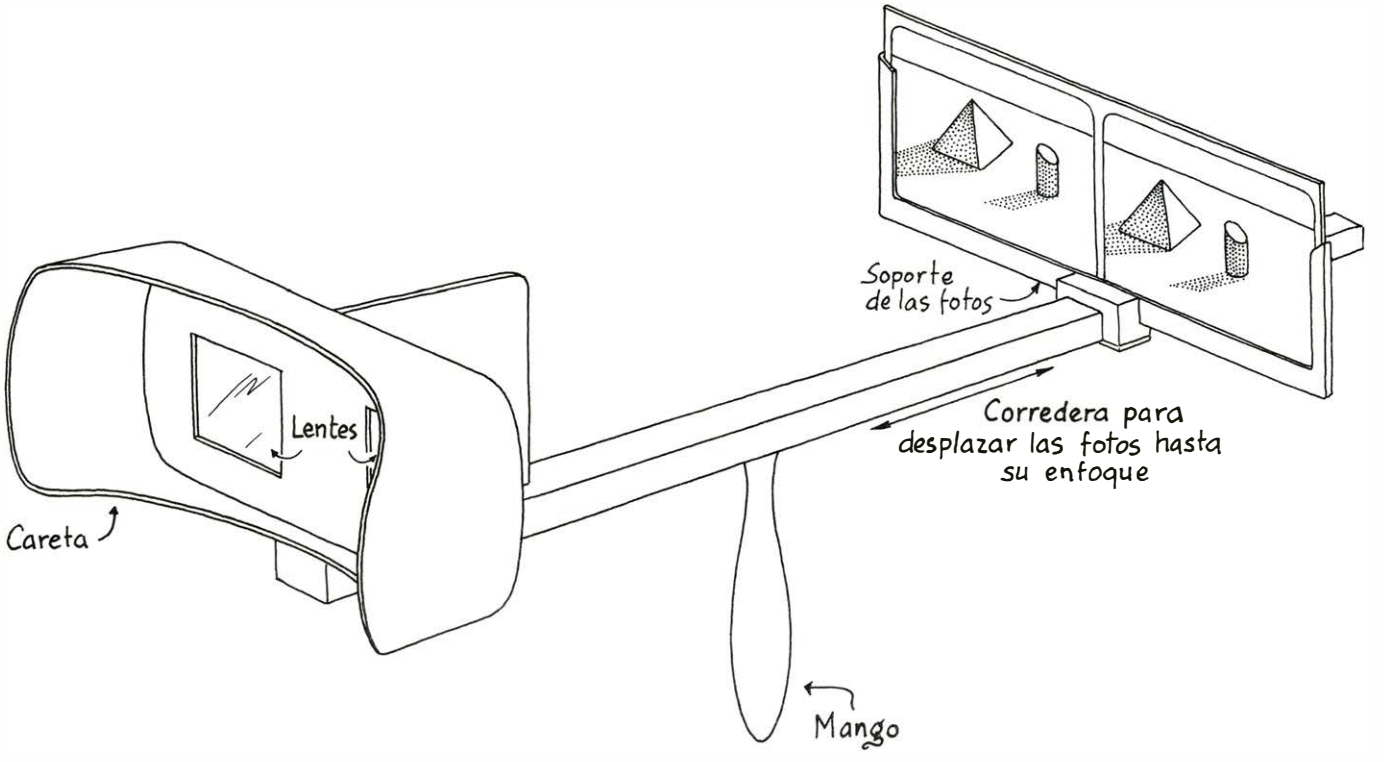
Greenslade y Green fueron capaces de hacer sus fotografías con una cámara Polaroid (Modelo 180) que tenía una lente con distancia focal parecida a la del antiguo estereoscopio que habían comprado. En un experimento querían confirmar cómo el desplazamiento lateral de la posición de la cámara entre sucesivas fotografías afectaba a la calidad de la ilusión tridimensional. Idealmente el desplazamiento debería ajustarse a la distancia entre los ojos del observador, pero la profundidad aparecía en las fotografías incluso cuando el desplazamiento de la cámara era mayor o menor que la distancia ideal. Con un desplazamiento grande, sin embargo, los objetos en la fotografía aparecían irreales en proporción de delante atrás debido a que la mayor separación les daba demasiada profundidad.

Greenslade y Green encontraron también que pueden hacerse fotografías estéreo rotando la cámara un pequeño ángulo (7,7 grados) entre fotografías sucesivas. La rotación parecía alterar la perspectiva suficientemente como para permitir que el observador percibiera la profundidad en las imágenes al mezclar éstas. Es posible que el lector desee experimentar con un rango de ángulos para ver si el efecto tridimensional persiste y si ángulos amplios dan lugar a distorsiones en la imagen percibida.

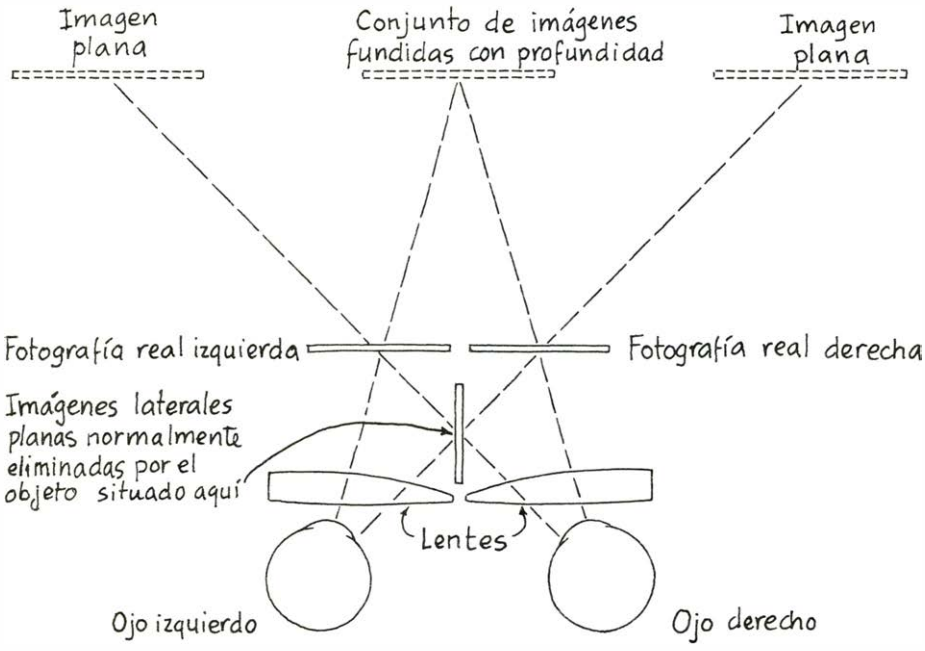


Un modelo de reflexión múltiple

A mí me resultó bastante fácil, usando una Polaroid modelo 104, hacer fotografías estéreo de escenas en la calle sujetando la cámara con las manos. Si se usa un trípode para desplazar o girar la cámara se mejorará, sin duda, la calidad de las fotografías, pero la ilusión tridimensional aparecía con facilidad, incluso a pesar de mi escaso equipo. Enfoqué la parte izquierda del campo de visión de la cámara a un objeto e hice una fotografía. Después giré la cámara unos 5 o 10 grados hacia la izquierda, la enfoqué de forma que el objeto de referencia



Componentes de un estereoscopio



Optica de un estereoscopio

estuviera a la misma altura en el campo de visión e hice la segunda fotografía.

Luego recorté los bordes blancos de las fotografías y las puse en el estereoscopio. Al mirar las fotografías a través del instrumento, desplacé una de ellas a través de mi campo de visión hasta que se acercó a la posición correcta, después las fotografías se juntaron de repente para componer una sola imagen con profundidad. Entonces las pegué y las monté sobre un trozo de cartón para mantenerlas con la separación correcta.

Cuando las fotografías ya estaban colocadas correctamente, mi ojo izquierdo veía más de la parte izquierda de la escena que mi ojo derecho. Esta diferencia es automática si se hace girar o se desplaza lateralmente la cámara. Incluso fotografiando exactamente la misma escena sin mover la cámara, entre dos exposiciones sucesivas, conseguí obtener una buena ilusión tridimensional manipulando la posición de las fotografías en el estereoscopio. Sin embargo, esto no siempre es posible.

A mí me parece francamente divertido el fabricarse uno mismo las propias tarjetas estéreo. Se puede usar incluso una vieja instantánea Polaroid si se tiene duplicada, bien por Polaroid o haciéndose uno mismo una fotografía. Para conseguir nuevas parejas de fotografías el mejor tipo de escenas a captar es el que tenga objetos tanto en primer plano como en segundo.

Normalmente se asigna la profundidad a una escena con la ayuda de algunas pistas, entre ellas el hecho de que se conoce el tamaño relativo de los objetos que se ven y, por tanto, se puede calcular su distancia en parte con los ángulos relativos que subtienden en el campo de visión. Asimismo ayudan las sombras y la geometría convergente de objetos tales como paredes y carreteras, cuando se las ve alejándose del observador.

También se siente inconscientemente la acomodación y convergencia de los propios ojos cuando se mira un objeto en una escena. La acomodación refleja la cantidad de tensión muscular que debe ejercerse sobre la lente del cristalino del ojo para alterar su forma de manera que la imagen del objeto esté enfocada en la retina. Esta pista para la profundidad no depende de un juego entre los dos ojos, sino que es monocular.

La convergencia es una pista binocular relacionada con el ángulo en los ejes ópticos de los ojos. El eje es una línea imaginaria que pasaría por el centro de la lente y penetraría en la fóvea, que es la pequeña depresión de la retina donde se concentran los fotorreceptores. La visión normal supone el movimiento de los ojos hacia la izquierda o derecha hasta que la imagen del objeto queda dentro del campo de la fóvea. Para un objeto distante, los ejes ópticos de los dos ojos son casi paralelos. Para un objeto próximo forman un ángulo acusado. El control muscular necesario para hacer que los ejes ópticos converjan en un objeto ayuda a calcular la distancia a que se encuentra.

Supongamos que el observador ve una colección de objetos que están a distintas distancias. Tendrá una idea de sus diferentes profundidades aun cuando no se los mire individualmente porque las posiciones de sus imágenes en la retina alrededor de la fóvea serán diferentes para los dos ojos simplemente debido a la separación de éstos. La diferencia de posición con respecto a la fóvea será mayor con un objeto próximo que con uno distante. A través de este efecto, el cerebro puede asignar las profundidades distanciadas adecuadas a los objetos.

Para volver a crear la profundidad en una fotografía bidimensional, el problema a solucionar será conseguir que el cerebro ignore las pistas que sugieren la bidimensionalidad al ver la fotografía. Cuando se mira ésta, tanto el enfoque de cada ojo como la convergencia entre ellos nos informan que estamos mirando una fotografía y no una escena real. Si se colocan dos fotografías adyacentes, el efecto es el mismo, el cerebro sabe que se están mirando dos fotografías adyacentes.

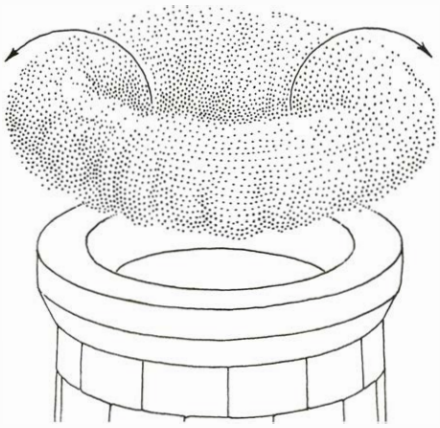
El estereoscopio nos permite enfocar las fotografías mientras se está obligando a los ojos a converger; resulta así que las imágenes ocupan en cada retina las mismas posiciones que ocuparían si se estuviera mirando a la escena real. Esta sensación es tan fuerte, al menos para la gente que puede ver la ilusión tridimensional, que uno se convence de que hay profundidad en las fotografías mezcladas. De esta forma el cerebro está tan dispuesto a asignarles profundidad que las fotografías en el estereoscopio no tienen que estar exactamente en su posición correcta. A medida que se acercan a la posición adecuada el cerebro aúna de inmediato sus imágenes y empieza a asignarles profundidad. Esto puede hacerlo en cierta medida incluso con fotografías que son duplicados exactos.

Aun cuando un estereoscopio es un medio cómodo de obtener esta ilusión, no es estrictamente necesario. Se puede ver profundidad en una simple tarjeta estéreo, por medio de un simple truco. Después de fijar los ojos en un objeto que esté situado a unos 150 centímetros deslice rápidamente una tarjeta estéreo en el campo de visión. Mientras lo va enfocando, trate de mantener la misma convergencia de los ojos que tenía para el objeto alejado. Con alguna práctica este truco le permitirá mezclar las dos imágenes de la tarjeta estéreo en una sola con profundidad, lo mismo que se hace con un estereoscopio. Yo mismo puedo crear esta ilusión tridimensional a voluntad y sin el truco descrito, simplemente mirando con fijeza una tarjeta estéreo mientras ajusto la convergencia de mis ojos hasta que las dos imágenes, una de cada ojo, se funden.

Tanto si se hace por medio del truco como si se hace con la técnica de la fuerza bruta, lo que se ve es notablemente distinto de la ilusión del estereos-

copio. Sin el instrumento se ve, en cada lado de la imagen con profundidad, otra imagen adicional bidimensional de la escena en la tarjeta estéreo. Greenslade y Green ofrecen una demostración para explicar las dos imágenes planas. Se deben fijar los ojos en un objeto colocado a una distancia de unos 150 centímetros, sujetando simultáneamente dos lápices en posicion vertical a unos 25 centímetros delante de los ojos separados entre sí unos 8 centímetros. Se observará que no se ven las imágenes de dos lapiceros, sino de cuatro, dos en cada ojo. A medida que uno se concentra en el objeto distante, se deben ir acercando los lápices entre sí hasta que se mezclan las dos imágenes más próximas. Esta mezcla de imágenes es la que forma la tridimensional cuando se mira una tarjeta estéreo a través del estereoscopio. Con los lapiceros las dos imágenes exteriores están todavía presentes: la de la izquierda corresponde al lápiz de la izquierda visto por el ojo derecho y la imagen de la derecha es la del lápiz derecho visto por el ojo izquierdo. En el estereoscopio esas dos imágenes exteriores que distraen se eliminan por medio de la fina pared del aparato, colocada entre los ojos y perpendicularmente a la cara.

En julio escribí sobre la forma de los penachos de humo de las chimeneas bajo varios perfiles de temperaturas verticales. G. Frederick Stork de Chevy



Un remolino de humo anular

Chase, Md., me ha enviado una fotografía de un hecho raro: un anillo de humo. Aun cuando él no vio la formación del mismo, ambos creemos que éste debió ser expulsado por la chimenea que aparece en primer término. Cuando se envía una bocanada de gas caliente a través de una abertura circular, la viscosidad entre la pared y los gases adyacentes a la misma hacen que esos gases se muevan más lentamente que los del centro, consiguiendo que los últimos se ondulen sobre los primeros una vez que han emergido. Esta ondulación crea la estructura anular. El cañón de la chimenea debe haber condensado de alguna manera el agua de la bocanada y así el anillo se hace visible.

Fotografía de un anillo de humo de una chimenea, realizada por G. F. Stork

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MATRIMONIO Y FERTILIDAD EN LOS PAISES DESARROLLADOS

FERTILITY DECLINE IN THE UNITED STATES AND ITS IMPLICATIONS. Charles F. Westoff en *Demographic Dynamics in America*, por Wilbur J. Cohen y Charles F. Westoff. The Free Press, 1977.

SOME SPECULATIONS ON THE FUTURE OF MARRIAGE AND FERTILITY. Charles F. Westoff en *Family Planning Perspectives*, vol. 10, n.º 2, págs. 79-83; marzo/abril, 1978.

THE PREDICTABILITY OF FERTILITY IN DEVELOPED COUNTRIES. Charles F. Westoff en *Population Bulletin of the United Nations*, n.º 11, 78. XIII. 7, en prensa.

MOLECULAS NUCLEARES

RESONANCE ENERGIES AND PARTIAL WIDTHS OF QUASIMOLECULAR STATES FORMED BY THE TWO CARBON NUCLEI. B. Imanishi en *Physics Letters*, vol. 27B, n.º 5, págs. 267-270; 5 de agosto de 1968.

QUASIMOLECULAR STRUCTURE IN ELASTIC $O^{16}+O^{17}$ SCATTERING. Werner Scheid, Walter Greiner y Richard Lemmer en *Physical Review Letters*, vol. 25, n.º 3, págs. 176-180; 20 de julio de 1970.

POSSIBLE QUASI-MOLECULAR ROTATIONAL BANDS IN THE SD-SHELL NUCLEI. A. Arima, Gertrude Scharff-Goldhaber y K. W. McVoy en *Physics Letters*, vol. 40B, n.º 1, págs. 7-10; 12 de junio de 1972.

NUCLEAR MOLECULAR STRUCTURE IN ^{12}C-^{12}C SCATTERING. H.-J. Fink, W. Scheid y W. Greiner en *Nuclear Physics*, vol. A188, págs. 259-288; junio-julio, 1972.

CENTRALES ENERGETICAS DE CELULAS DE COMBUSTIBLE

FUEL CELLS AND FUEL BATTERIES: A GUIDE TO THEIR RESEARCH AND DEVELOPMENT. Herman A. Liebhafsky y E. J. Cairns. John Wiley & Sons, 1968.

FUEL CELLS FOR PUBLIC UTILITY AND INDUSTRIAL POWER. Dirigido por Robert Noyes. Noyes Data Corporation, 1977.

LA ESTRUCTURA DE LA HEMOGLOBINA Y EL TRANSPORTE RESPIRATORIO

HEMOGLOBIN AND MYOGLOBIN IN THEIR REACTIONS WITH LIGANDS. Eraldo Antonini y Maurizio Brunori. North-Holland Publishing Company, 1971.

MAN'S HAEMOGLOBINS. H. Lehmann y R. G. Huntsman. J. P. Lippincott Company, 1974.

HUMAN HEMOGLOBINS. H. Franklin Bunn, Bernard G. Forget y Helen M. Ranney. W. B. Saunders Company, 1977.

OJOS ANIMALES DONDE LA IMAGEN SE FORMA MEDIANTE ESPEJOS

ON THE ORGANIZATION OF REFLECTING SURFACES IN SOME MARINE ANIMALS. E. J. Denton en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, vol. 258, págs. 285-313; 14 de mayo de 1970.

THE PHYSICS AND BIOLOGY OF ANIMAL REFLECTORS. M. F. Land en *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 24, págs. 75-106; 1972.

EL TEMPLO ARRASADO DE AKHENATON

THE AMARNA PERIOD AND THE END OF THE EIGHTEENTH DYNASTY. Cyril Aldred en *Cambridge Ancient History, Vol. 2, Part 2; History of the Middle East and the Aegean Region c. 1380-1000 B.C.*, dirigido por I. E. S. Edwards, C. J. Gadd, N G. L. Hammond y E. Sollberger. Cambridge at the University Press, 1975.

RECONSTRUCTING THE TEMPLES OF A HERETICAL PHARAOH. Donald B. Redford en *Archaeology*, vol. 28, n.º 1, págs. 16-22; enero, 1975.

THE EXCAVATIONS OF THE UNIVERSITY MUSEUM AKHENATEN TEMPLE PROJECT AT KARNAK. Donald B. Redford en *Expedition*, vol. 19, n.º 4, págs. 33-38; verano, 1977.

NEBULOSAS GASEOSAS

GALACTIC AND EXTRA-GALACTIC RADIO ASTRONOMY. Dirigido por Gerrit L. Verschuur y Kenneth I. Kellerman. Springer-Verlag, 1974.

A MICROWAVE INVESTIGATION OF THE TRIFID NEBULA AND ITS SURROUNDING ENVIRONMENT. Eric J. Chaisson y Robert F. Willson en *The Astrophysical Journal*, vol. 199, págs. 647-659; 1 de agosto de 1975.

GASEOUS NEBULAE AND THEIR SURROUNDING ENVIRONMENT. Eric J. Chaisson en *Frontiers of Astrophysics*. Harvard University Press, 1976.

METABOLISMO MOLECULAR DE LA TRANSDUCCION DE ENERGIA

MEMBRANE ADENOSINE TRIPHOSPHATASE OF *MICROCOCCUS LYSODEIKTICUS*, MOLECULAR PROPERTIES OF THE PURIFIED ENZYME UNSTIMULATED BY TRYPSIN. José Manuel Andreu, J. Antonio Albendea y Emilio Muñoz en *European Journal Biochemistry*, vol. 3, págs. 505-515; septiembre, 1973.

MITOCHONDRIAL ADENOSINE TRIPHOSPHATASE. Peter L. Pedersen en *Bioenergetics*, vol. 6 n.º 6, págs,. 243-275, febrero, 1975.

STRUCTURE AND FUNCTION OF CHLOROPLAST ATPASE. Nathan Nelson en *Biochimica et Biophysica Acta*. vol. 456, n.º 3/4, págs. 314-338; noviembre, 1976.

H^+-ADENOSINE TRIPHOSPHATASE AND MEMBRANE ENERGY COUPLING. I. A. Kozlov y V. P. Skulachev en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 463, n.º 1, págs. 29-89; junio, 1977.

COMO FABRICAN ATP LAS CELULAS. Peter C. Hinkle y Richard E. McCarty en *Investigación y Ciencia*, n.º 20, págs. 58-75; mayo, 1978.

JUEGOS MATEMATICOS

SEMANTIC INFORMATION PROCESSING. Dirigido por Marvin Minsky. The MIT Press, 1968.

UNDERSTANDING NATURAL LANGUAGE. Terry Winograd. Academic Press, 1972.

COMPUTER MODELS OF TOUGHT AND LANGUAGE. Dirigido por Roger C. Schank y Kenneth Mark Colby, W. H. Freeman and Company, 1973.

TALLER Y LABORATORIO

PAPER MOVIE MACHINES. Budd Wentz. Troubadour Press, 1975.

MAKING VICTORIAN KINETIC TOYS. Philip y Caroline F. Sayer. Taplinger Publishing Co., 1977.

READY-TO-MAKE PHOTO & SCENE MACHINES. Budd Wentz. Troubadour Press, 1977.

Taller y laboratorio

Microfotografías claras y brillantes con un equipo sencillo y económico

Jearl Walker

El mundo oculto que revela el microscopio ha fascinado a muchos científicos aficionados. Durante los últimos 20 años, varios de estos animosos investigadores han llegado a adquirir una notable habilidad para fotografiar lo que observaban a través del microscopio. Este mes analizaremos algunas técnicas que permiten a los diestros en el uso del microscopio sacar tales imágenes fotográficas.

Podemos encontrar información sobre la microfotografía en diferentes fuentes. La mía procede de James Bell, de Allston, Massachusetts. Ya han aparecido fotografías suyas en *Investigación y Ciencia* y, en esta ocasión, nos ha suministrado diversas muestras de lo que su técnica microfotográfica es capaz de conseguir (tales ejemplares los hemos reproducido en las dos páginas siguientes). La variedad de especímenes que pueden observarse y fotografiarse es casi infinita, de ahí que los ejemplos de Bell los demos sólo a título de introducción. Aunque los fotógrafos profesionales suelen trabajar con equipos muy complejos y caros, las fotografías realizadas por Bell muestran que hasta con un equipo sencillo y económico pueden hacerse fotografías de sorprendente belleza y de gran interés científico.

Bell trabajó con un microscopio monocular Bausch and Lomb fabricado en 1915, equipado con unos viejos objetivos Leitz de 10 y 100 aumentos y unos oculares con un poder de aumento de 10, 7 y 2,5. Disponía de un espejo para dirigir la luz hacia un condensador, el cual hacía que toda la luz convergiera sobre la muestra. Bell quitó el objetivo de su cámara Asahiflex de 35 milímetros, e incorporó la misma al microscopio con un adaptador especial para microscopio, que se encuentra en las tiendas del ramo y que sirve para evitar el paso de la luz del exterior. Enfocó el microscopio de manera que la imagen se formara sobre el cristal del fondo de la cámara. Para evitar los movimientos a la hora de hacer las fotos, Bell accionaba la cámara con un cable disparador. Sacó las fotos con velocidades de obturación entre 1/500 y 1/25 segundos, empleando películas Ektachrome–X o bien Ektakrome–64.

Hay que usar luz muy intensa, pues sólo una pequeña parte de ella llega a la película. Bell se servía para la iluminación de un proyector de diapositivas normal con una lámpara de 400 watt. Para colimar la luz sustituyó el objetivo del proyector por otro que concentraba la luz. En caso de trabajar con menos luz que la empleada por Bell, es necesario incrementar el tiempo de exposición en un segundo o incluso más. Más difícil resulta obtener fotografías claras; con objetos en movimiento, lo más probable es que sólo consigamos un borrón. Si para una fotografía en particular, la luz es demasiado intensa, Bell la atenúa colocando filtros de transparencia uniforme en la trayectoria de los rayos procedentes del proyector. Dichos filtros pueden comprarse en las casas de artículos fotográficos o pueden ser fabricados fotografiando una hoja de papel blanco y revelando el negativo.

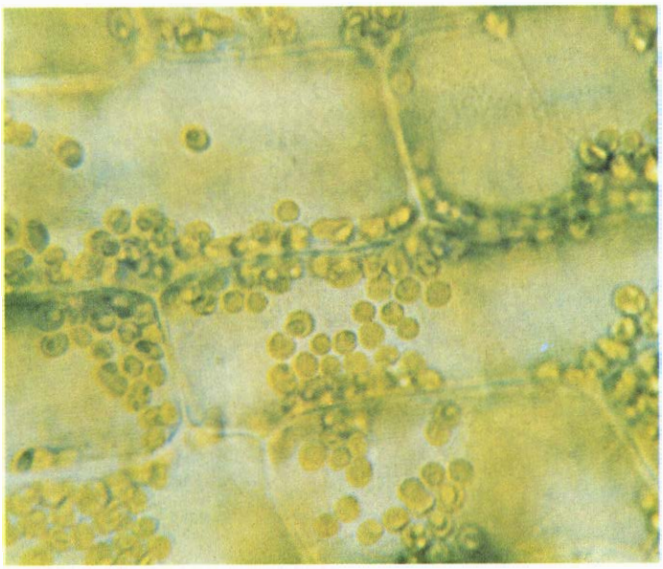
El componente infrarrojo del rayo de luz puede dañar a las muestras, sobre todo si se trata de organismos vivos. Para eliminar dicho componente nocivo de los rayos, puede colocarse un recipiente con agua (de caras paralelas para evitar reflexiones) o bien diversas piezas de cristal óptico en la trayectoria del rayo de luz. El proyector puede incorporar un sistema de refrigeración con idéntica finalidad práctica.

La iluminación con fondo claro es la más común de los diversos tipos de iluminación que se pueden emplear, pero tiene el inconveniente de que destaca poco los detalles de las muestras. Bell logra este tipo de iluminación orientando el espejo de manera que el condensador situado debajo del soporte del espécimen en el microscopio haga que toda la luz converja en dicha muestra. Obrando así, se verá la luz transmitida a través del espécimen. Esta técnica no podrá aplicarse, pues, ni con especímenes gruesos ni opacos, e incluso con muestras delgadas no siempre se distinguirá bien su estructura interna. Por otra parte, los colores naturales de los elementos u organismos a observar, se pierden frecuentemente con el fondo claro. De todos modos, esta técnica puede resultar útil para fotografiar muestras finas en blanco y negro.

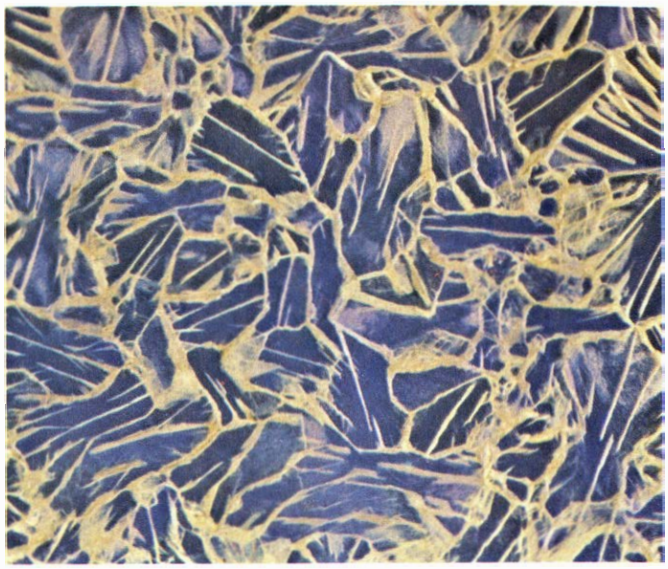
Si se quiere obtener la mayor resolución posible, aspecto crucial en trabajos de mucho aumento, deben secundarse las directrices que se indican, respecto a la iluminación Köhler, en el libro *Photography through the Microscope,* auténtica biblia de la microfotografía. Dicho libro ha sido publicado por la Eastman Kodak Company. El manual le dirá cómo ajustar el espejo, el colector y el condensador, de manera que el filamento de la lámpara esté enfocado sobre el condensador y éste a su vez enfoque la imagen del colector sobre el soporte de la muestra. (El colector es la lente situada entre el espejo y la fuente de luz.) Con este método de enfoque la muestra queda uniformemente iluminada y no se ve la imagen enfocada del filamento.

La primera de las fotografías de Bell, que aparece en la ilustración de la página siguiente (arriba, a la izquierda), constituye es un ejemplo de la técnica de fondo claro. Bell empleó 1100 aumentos para fotografiar células vivas del alga de agua dulce *Elodea*, poniendo de manifiesto los distintos cloroplastos. Momentos después de haber tomado la fotografía, los cloroplastos comenzaron a girar dentro de las células conforme iba produciéndose en ellos la fotosíntesis a partir de la luz procedente del proyector. Aunque algunos detalles salen en la fotografía, la imagen no es tan nítida como en otras fotografías, debido en parte a que ese elevado aumento redujo la profundidad de campo.

Puede obtenerse un buen contraste en la foto si colocamos la muestra sobre un fondo negro. Para conseguir dicho fondo mientras el objeto a observar seguía estando iluminado, Bell puso un punto negro en un filtro de cristal blanco, que situó justo debajo del condensador instalado bajo el portaobjetos. Tenía bien abierto el diafragma del condensador de suerte que suministrara un ancho cono de luz. El punto negro tenía por misión proyectar una sombra sobre la muestra a fotografiar. La luz que sobresalía por los bordes del punto iluminaba la muestra con luz blanca, por lo que sus colores naturales seguían viéndose. Cuando el portaobjetos está vacío, los rayos de luz que llegan al objetivo

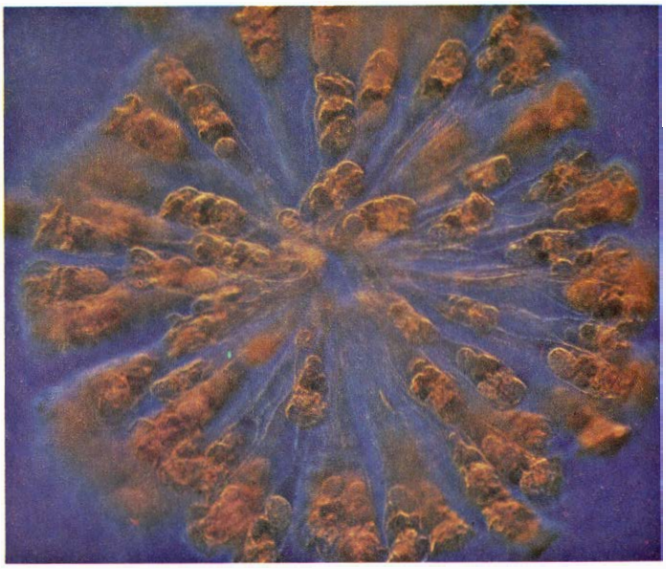


Alga fotografiada con la técnica de campo brillante de James Bell

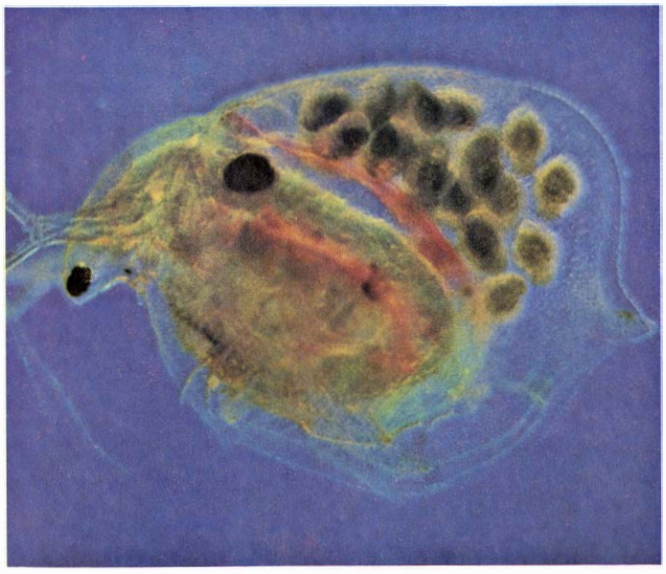


Cristales de éster de colesterol

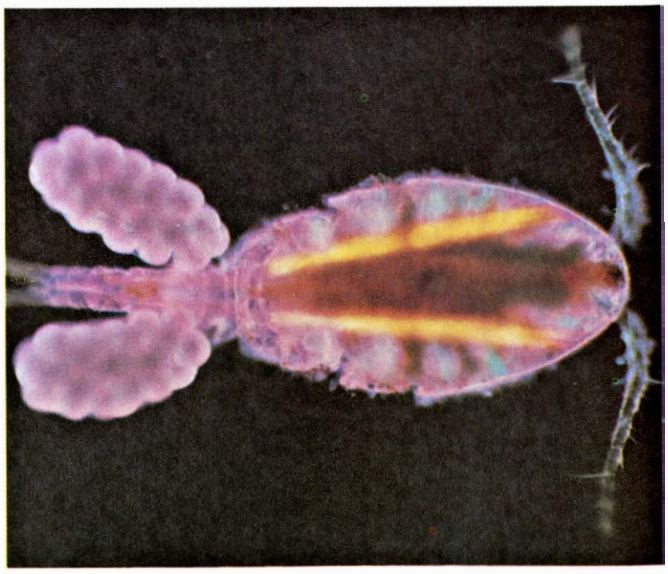
Embrión de caracol



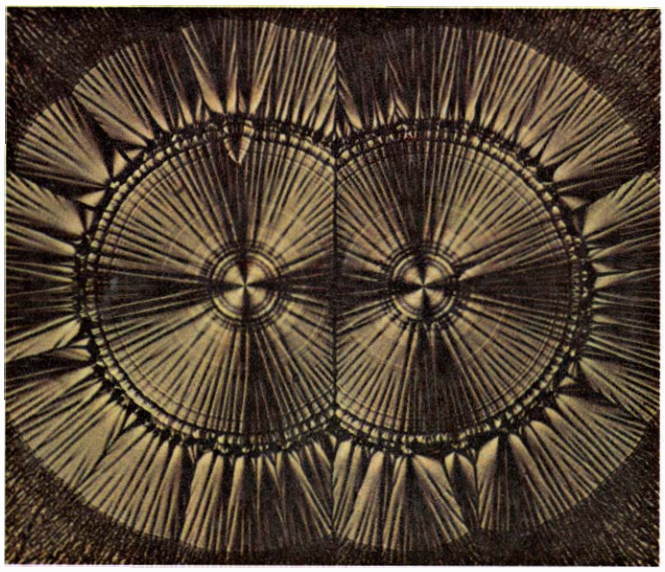
Colonia rotífera de **Conochilus**



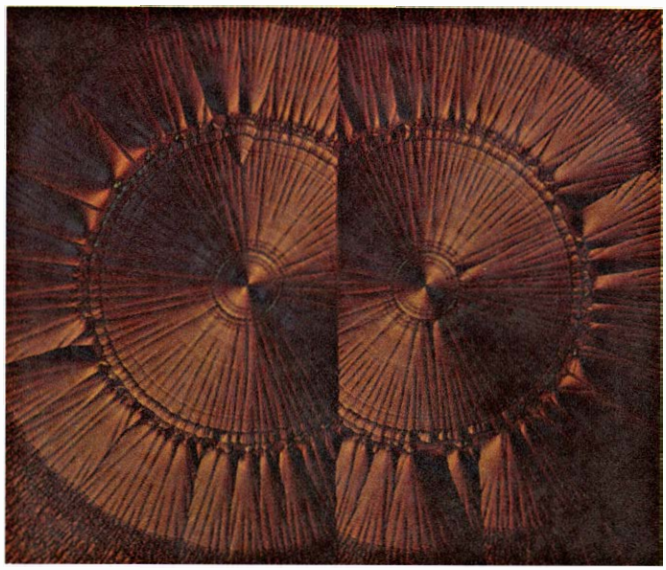
La pulga de agua **Simocephalus**



El copépodo **Cyclops**

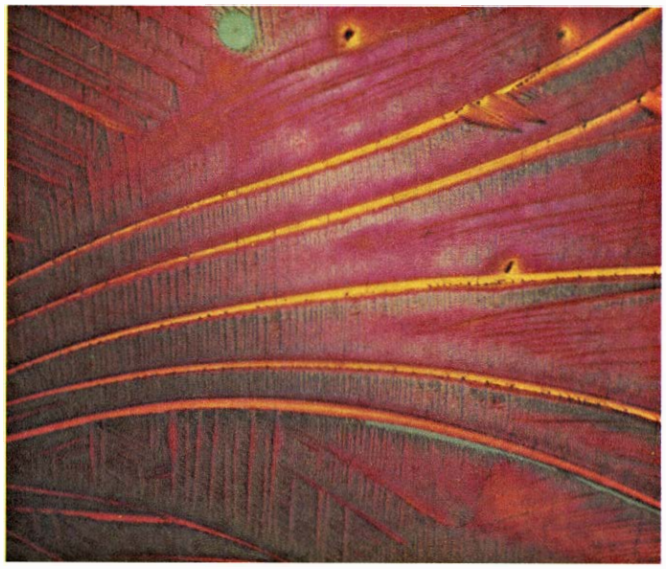


Cristal de vitamina C

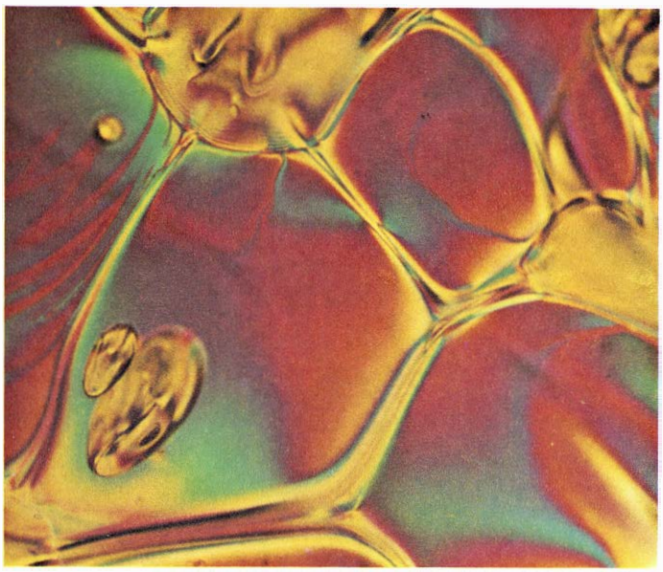


El mismo cristal visto a través de celofán polarizador

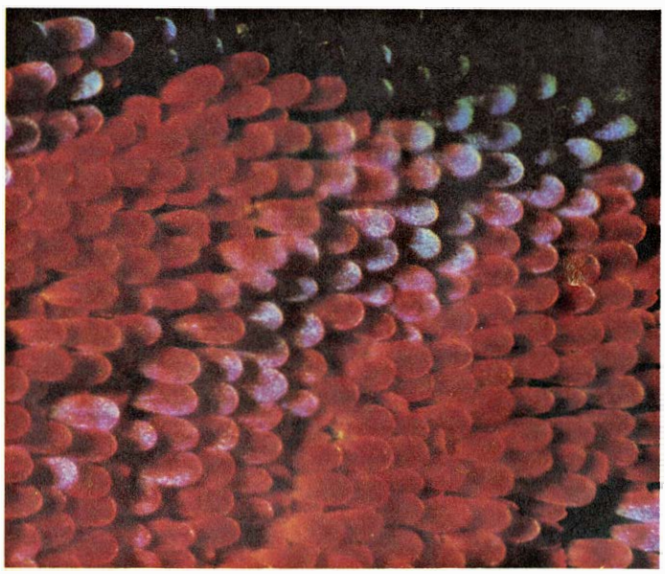
Cristales de ácido hipúrico



Cristales de resorcinol



Cristal líquido nemático



Ala de mariposa

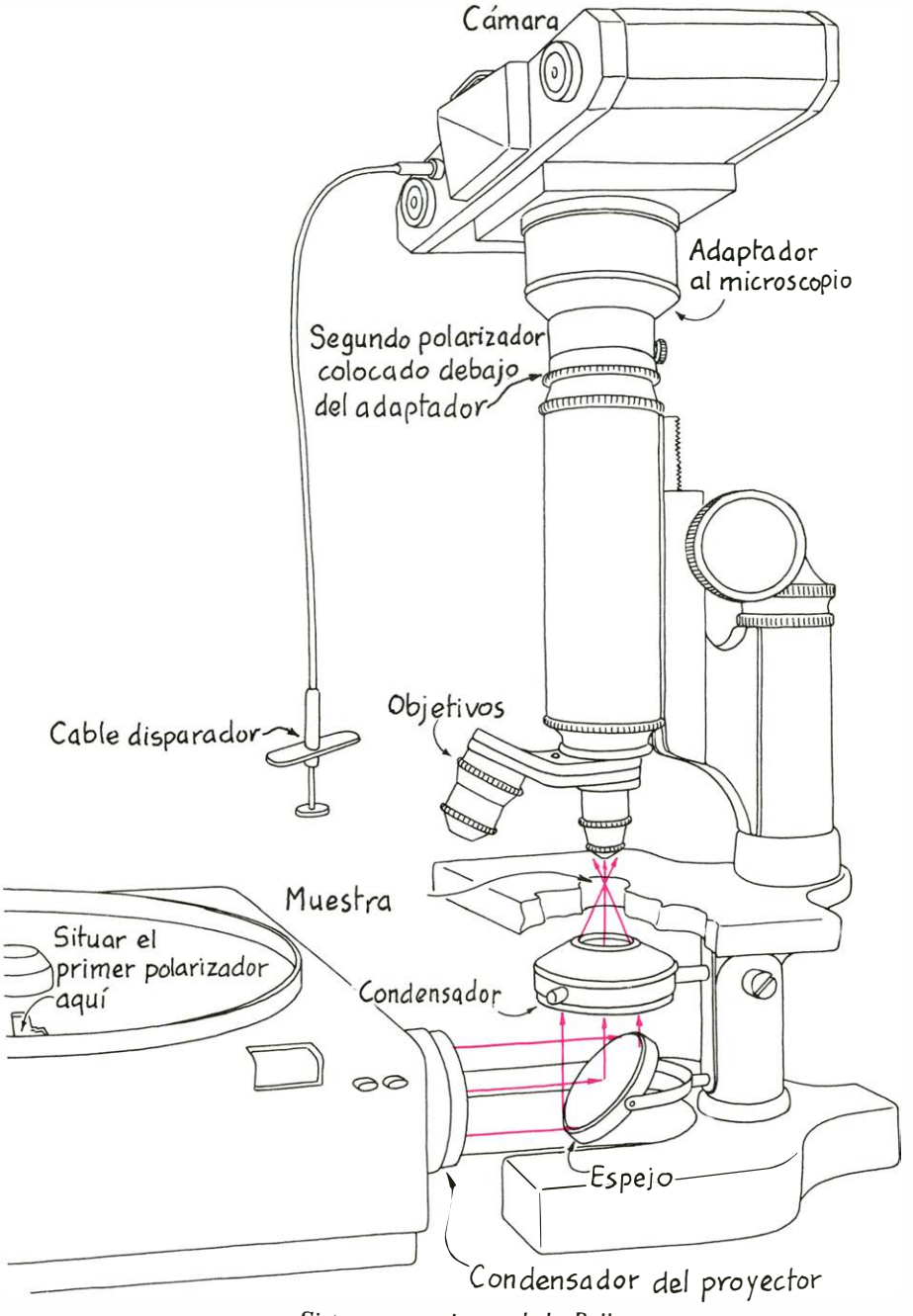
del microscopio han sufrido una divergencia tal que no entra ninguna luz por el tubo; ello determina que ni el observador ni la cámara vean más que un campo obscuro. Con la muestra en el portaobjetos, la luz se dispersa desde él hacia el interior del tubo, permitiendo que el espécimen pueda contemplarse. Esta técnica requiere una intensa fuente luminosa, ya que sólo llegará a la cámara una pequeña parte de la luz inicial.

El filtro para producir el fondo negro se construye pegando un pequeño círculo opaco de cartulina negra sobre un filtro de cristal transparente. El diámetro del círculo debe ser de cinco milímetros o algo más. Conviene determinar el tamaño óptimo probando varios en su propio microscopio. El campo debe verse obscuro cuando no haya nada en el portaobjetos, y aparecerá iluminado cuando coloquemos un espécimen para su observación.

Bell domina la técnica de la iluminación con fondo obscuro con sólo su objetivo de bajo aumento (10 diámetros). Un aumento mayor da lugar a fotografías con un contraste menor debido a la dificultad de mantener la lente que hace de objetivo dentro del cono obscuro proyectado por el punto opaco. Para enfocar correctamente, los objetivos de muchos aumentos deben aproximarse bastante a la muestra; la lente empieza luego a interceptar algunos rayos de luz que provienen de los bordes del punto opaco. Para trabajar según la técnica de Bell con grandes aumentos, habría que comprar un condensador de fondo obscuro, que proporciona un cono de obscuridad más fino.

Con su técnica de fondo obscuro, Bell fotografió un espécimen de *Hydra* y algunas colonias de *Volvox* que había encontrado en estanques locales. Se puede encontrar una relación completa de las muestras útiles para su observación en libros especializados que suelen venderse en los museos de historia natural. (Puede consultarse, con provecho, el *Atlas de microscopia,* de J. Bernis Mateu, 1975.)

Puesto que la técnica fotográfica de Bell puede aplicarse a organismos vivos, si uno tiene suficiente paciencia puede obtener fotografías diferentes de una misma muestra en situaciones diversas, de acuerdo con su comportamiento característico. Así, podemos fotografiar una hidra comiendo. Dándole pequeños gusanos de agua o bien diminutos trozos de carne cruda, se puede conseguir que abra la boca y despliegue sus tentáculos. Headstrom refiere que con una pequeña cantidad de ácido acético o verde de metilo consigue provocar que la hidra descargue uno de sus nematocistos. Estos tubos llenos de púas son lanzados con tal fuerza que pueden penetrar incluso en la presa del animal.



Sistema experimental de Bell

Los *Volvox* forman una colonia esférica gelatinosa, constituida por cientos de organismos flagelados. Si se mira desde muy cerca a una de estas colonias, puede apreciarse que su superficie está como bordada por flagelos, que son los apéndices en forma de latiguillo mediante los cuales los individuos flagelados pueden autopropulsarse. Headstrom recomienda recolectar muestras de este tipo con un tubo de cristal. Una vez que haya localizado una muestra en el agua de un estanque o de una charca, para lo cual quizá sea conveniente ayudarse con una lupa, introduzca el tubo en el agua manteniéndolo tapado con el dedo. Cuando el espécimen esté lo suficientemente cerca de la boca del tubo, quite el dedo; probablemente, la muestra se verá arrastrada hacia el interior del tubo por la corriente de agua que se forma al llenarse. Vuelva a tapar el tubo con el dedo y sáquelo del agua. A continuación, con mucho cuidado, vierta el agua sobre el portaobjetos del microscopio hasta que el espécimen quede depositado sobre el mismo. Para estas operaciones conviene usar portaobjetos especiales que tienen una pequeña concavidad donde queda recogida la muestra con una pequeña cantidad de agua.

Algunas muestras contrastan mejor

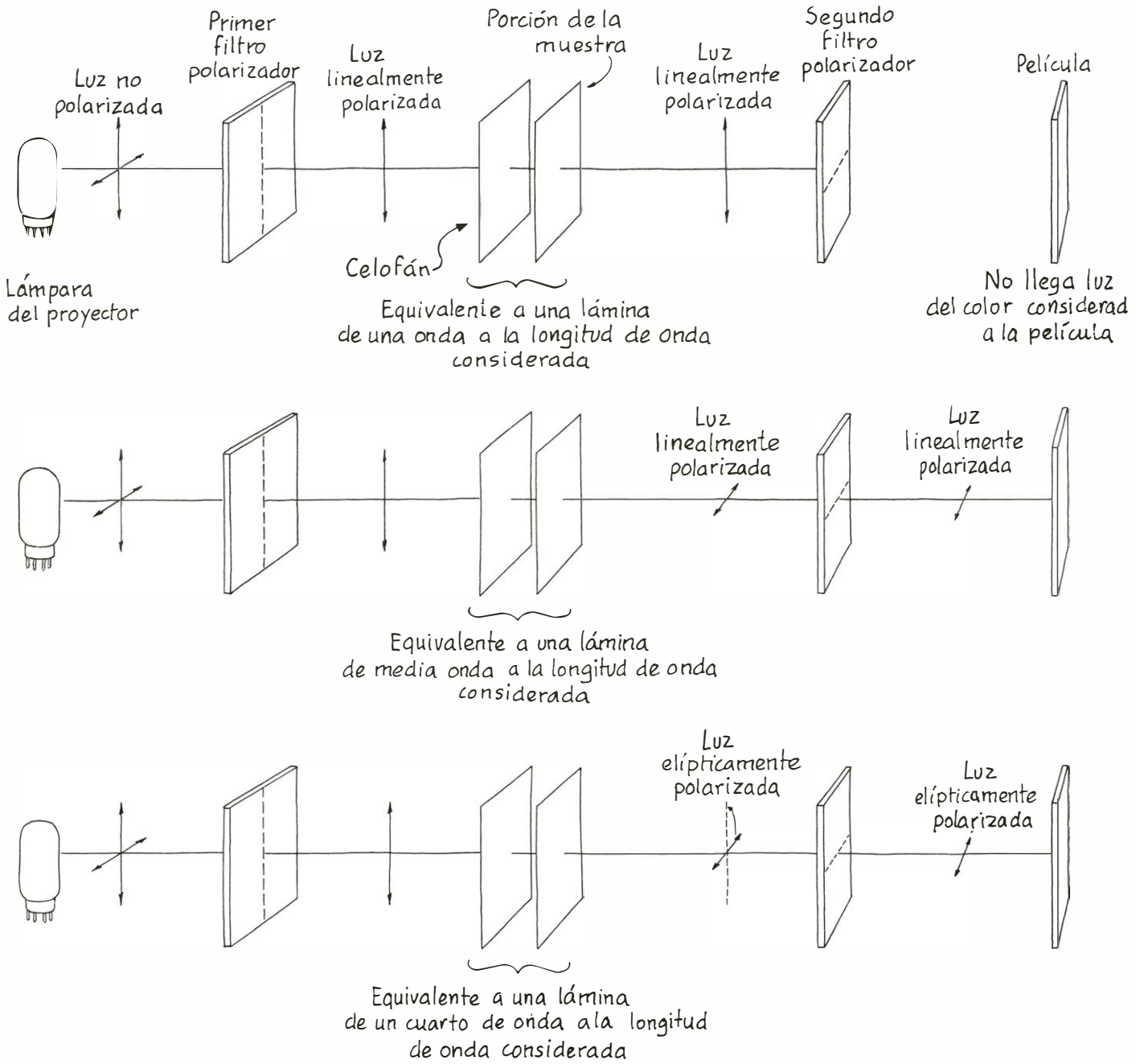
con un fondo de color que con un fondo obscuro. Para conseguir este tipo de colorido (llamado iluminación parcial Rheinberg), Bell sustituyó el punto opaco negro por un punto transparente de color. Por ejemplo, para conseguir un buen contraste con una muestra roja, Bell utilizaba un punto azul o verde, que recortaba de unos filtros de plástico de dichos colores. El espécimen continúa apareciendo con su color natural, ya que es iluminado principalmente por la luz blanca procedente de la zona exterior al punto.

Un fondo azul sirvió a Bell para fotografiar unos cristales de un éster de colesterol que habían recristalizado bajo el cubreobjetos. El fondo permite ver la interfase entre los cristales y las grietas provocadas por las tensiones internas dentro de cada cristal. Para fotografiar embriones del caracol de agua dulce cuando aún se encuentran dentro del huevo, Bell empleó un punto verde con un aumento de 80 diámetros. Estos delicadísimos detalles se hubiesen perdido totalmente con una iluminación con fondo brillante.

Con una iluminación Rheinberg completa, Bell puede seleccionar cualquier color para iluminar la muestra y puede elegir un color diferente para el fondo. El único cambio que debe sufrir el método es pegar un anillo de plástico ligeramente coloreado alrededor del punto más obscuro. La luz que atraviesa el punto da entonces el color del fondo, mientras que la luz procedente del anillo colorea la muestra.

A 120 aumentos, Bell fotografió con un punto azul y un anillo amarillo una colonia de rotíferos *Conochilus*. En una carta que el propio Bell me envió, me decía que los rotíferos habrían sido punto menos que invisibles con una técnica de iluminación de fondo brillante: el contraste de colores resulta fundamental para distinguir sus contornos y su estructura interna.

Bell asegura que la técnica más eficaz para obtener el mejor contraste de colo-



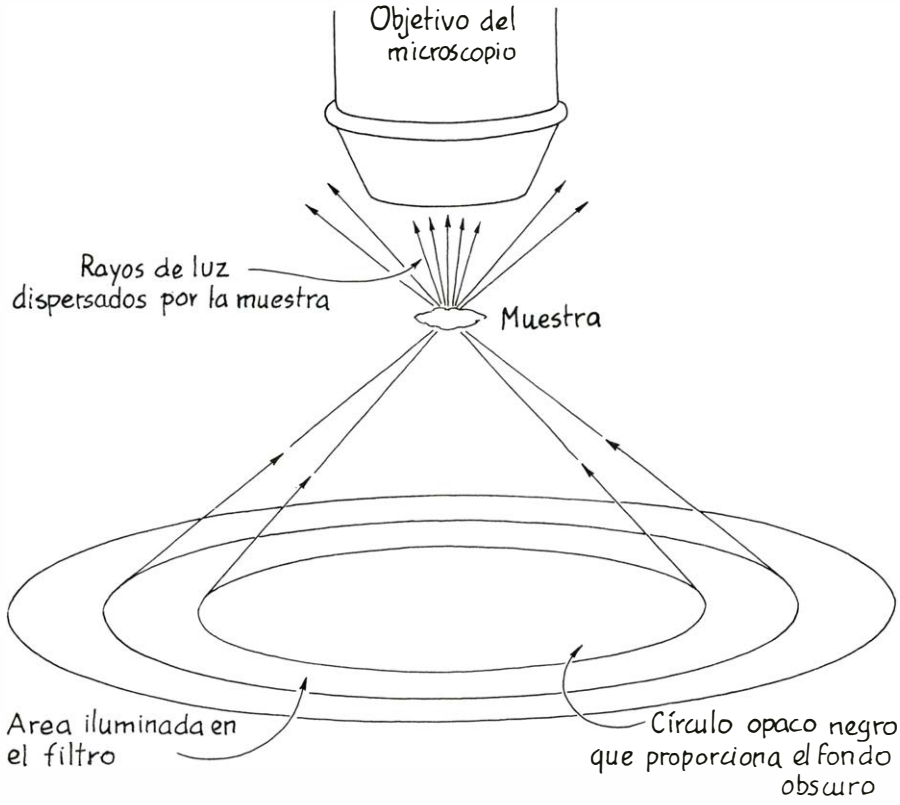
Cambios de la polarización debidos a la birrefringencia

res es hacer las fotografías usando luz polarizada. Esta técnica de trabajo sólo sirve con materiales birrefringentes, tales como los cristales, los músculos y algunos pequeños organismos pluricelulares. Se coloca un filtro polarizador en el proyector de diapositivas (como si fuera una diapositiva normal), con lo que el aparato suministra luz polarizada. Se introduce un segundo filtro en el ocular del microscopio, de manera que se pueda girar hasta que el campo de visión a lo largo del microscopio sea o bien obscuro o brillante, según que el filtro bloquee o deje pasar la dirección de polarización de la luz que viene a través del aparato.

Cuando se introduce un material birrefringente en el portaobjetos, la luz polarizada producida por el primer filtro altera su polarización cuando pasa a través del material. Si la alteración es adecuada, parte de la luz puede pasar entonces a través del segundo filtro polarizador, en el ocular, aun cuando el filtro bloquearía la luz. (En esta misma sección, en febrero de 1978, se trataron los pormenores de cómo un material birrefringente cambia el sentido de polarización.) En resumen, la luz se transmite a través de este material cuando parte de la misma está polarizada a lo largo de un eje y la otra polarizada a lo largo de un eje perpendicular. Ambos ejes son perpendiculares al rayo de luz. La velocidad de la luz es mayor en uno de los sentidos de polarización que en el otro. En razón de esta diferencia, los dos sentidos de polarización pueden salir procedentes del material fuera de fase. La polarización emergente está determinada por la combinación de dos sentidos de polarización: en consecuencia, la luz que sale podría estar polarizada de varias formas.

Si los dos sentidos de polarización salen con una diferencia de fase de media longitud de onda, la luz que emerge está otra vez linealmente polarizada, pero ahora lo estará a lo largo de un eje perpendicular a la dirección de polarización de la luz incidente. Esta luz que sale puede ser transmitida o bloqueada por el filtro polarizador situado en el ocular, según la orientación de éste.

Si la birrefringencia ha obligado a las direcciones de polarización que salen a estar desfasadas un cuarto de longitud de onda, la luz que emerge estará polarizada elípticamente; ello significa que la punta del vector de polarización gira alrededor del rayo de luz, describiendo una elipse. Esta luz pasará por el filtro situado en el ocular, con independencia de la orientación de éste. Si los sentidos de polarización emergentes coinciden, la luz transmitida estará polarizada de la misma forma que la luz incidente. La orientación del segundo filtro determinará entonces si se ve o no luz alguna.



Preparación de un fondo obscuro

El que se obtenga un resultado u otro depende del espesor y birrefringencia de la muestra y de la longitud de onda de la luz. Para una región concreta de la muestra, el extremo rojo del espectro de la luz blanca incidente sobre él puede acabar siendo bloqueado por el segundo filtro polarizador, mientras que puede transmitirse el azul. Esta zona aparecerá de color azul para el observador. Puede aparecer otra zona de color amarillo cuando estén bloqueados los otros colores de la luz blanca incidente. La ventaja de usar así luz polarizada estriba en que la variación de color que se produce en la muestra, que de otra forma sería incolora, permite al observador distinguir sus perfiles y su estructura.

Bell me ha enviado dos fotografías hechas con luz polarizada. En la primera, tomada a 120 aumentos, se aprecian cristales de ácido hipúrico que se habían disuelto en isopropanol y se recristalizaron luego en la diapositiva. La muestra era lo suficientemente birrefringente y no uniforme como para producir muchos colores. En el otro ejemplo (a 150 aumentos) se había disuelto cristales de resorcinol en acetona, que se quemó después para facilitar la recristalización rápida.

Se pueden producir más contrastes de color poniendo uno o más trozos de papel de celofán o de cinta adhesiva transparente en el soporte del filtro por debajo de la muestra. Ambos son materiales birrefringentes que alteran la polarización de la luz. En lugar de celofán podemos usar un trozo de mica fina que puede sacarse fácilmente de un fragmento mayor con una cuchilla. Se supone que cualquiera de estos materiales actúa como filtro retardador, porque obliga a que un sentido de polarización quede detrás del sentido perpendicular. Un filtro de retardo es útil para aumentar la variación de color en un modelo débilmente birrefringente. No todos los tipos de celofán habrán de valer, por lo que será preciso probar varios hasta dar con el adecuado. También podrían usarse hojas de plástico del tipo de las que se emplean para envolver alimentos, siguiendo las normas que expuse en mi artículo sobre birrefringencia.

Bell ha presentado algunos otros ejemplos de cómo usa la luz polarizada. Hizo una fotografía de 100 aumentos a una pulga de agua viva con su cría poniendo un punto azul de fondo y con celofán y filtros polarizadores para destacar la estructura interna del animal. La mancha del ojo queda en negro, y el tubo digestivo en naranja.

A 50 aumentos, fotografió de una forma similar el copépodo *Cyclops*, con

la diferencia que usó un punto negro para proporcionar un fondo obscuro. El animal aparece con la mancha de los ojos en rojo, dos bandas musculares en amarillo y el tubo digestivo en marrón. Los dos sacos laterales de forma de pera contienen huevos. Muchos de estos detalles se hubieran perdido en un campo iluminado normalmente.

Puede comprobarse el efecto del celofán en dos fotografías de Bell, ambas de ácido ascórbico (vitamina C) recristalizado por él. Las fotografías muestran los dos mismos cristales adyacentes, y se tomaron exactamente igual, con la salvedad de que se utilizó celofán para la segunda fotografía. Adviértase que en la última el color adicional se debe a la birrefringencia del celofán.

Bell preparó los cristales disolviendo ácido ascórbico en isopropanol, puso luego un poco de esta solución en un cristal portaobjetos y quemó después el alcohol. Los cristales se formaron a los pocos segundos. Una vez sacada una serie de fotografías, puede volverse a disolver el ácido ascórbico y empezar de nuevo. Esta técnica produce cristales lo suficientemente finos como para que resulten transparentes; por tanto, pueden fotografiarse fácilmente. Otro método de obtención de cristales es dejar que el disolvente se evapore lentamente.

El lector puede conseguir también una cristalización fundiendo la sustancia en un portaobjetos sobre una llama. Aquélla cristalizará al enfriarse. Bell no es muy partidario de esta técnica, pórque el punto de fusión de algunas sustancias es demasiado alto, y ello hace que se rompan muchos portaobjetos. Sin embargo, señala que, si se quieren estudiar ciertos tipos de cristales líquidos, habrá que recurrir a dicha técnica, enfriando la sustancia lentamente desde su punto de fusión para conseguir el estado de líquido cristalino. La fotografía de Bell de un cristal líquido nemático se sacó a 100 aumentos, a temperatura ambiente, tras haber disuelto el material en acetona. El movimiento en esta recristalización fue tan rápido que tuvo que disparar la fotografía a 1/500 segundos para retener la actividad.

Debido a su espesor algunas muestras no pueden fotografiarse con luz transmitida; el obstáculo se salva con luz reflejada. Para ello, Bell apoya el proyector en unos libros y ajusta el ángulo de la luz incidente hasta que obtiene la iluminación adecuada en la muestra. Un ejemplo del resultado es su fotografía del ala de una mariposa. Muchos de los colores que se ven en las alas de las mariposas, en los élitros de los escarabajos y en las plumas de las aves no se deben a la pigmentación, sino a la interferencia de las ondas de luz. Algunas alas de mariposa están formadas por capas de cutícula transparente. Cuando se refleja la luz de una de las capas, parte de ella procede de la reflexión en su superficie externa y otra parte proviene de su superficie posterior, después de haber atravesado la capa en cuestión. Los dos rayos emergentes pueden interferir entre sí para producir colores, como ocurre en las pompas de jabón (he descrito estas interferencias en esta misma sección en el número de noviembre). Quizás el observador quiera ver varios tipos distintos de alas de mariposa. Estas pueden comprarse en casas dedicadas a muestras empleadas en prácticas de ciencias naturales y en tiendas de objetos de regalo en muchas ciudades.

La interferencia de colores resultaría ser muy débil si el ala estuviera iluminada sólo con la luz transmitida. Los colores tendrían que aparecer, entonces, como consecuencia de la interferencia entre la luz transmitida por la capa similar a la cutícula (sin reflexión interna) y la luz doblemente reflejada en el interior de la capa, antes de salir. Esta luz será tan débil, con relación a la luz no reflejada, que producirá poca interferencia (y, por tanto, poco color).

Para encontrar la exposición ideal hay que controlar los disparos con una gama de tiempos de exposición o bien incorporar un medidor de luz en el microscopio. Bell usa un medidor de luz casero compuesto por un voltímetro digital capaz de detectar hasta varios milivolt y una fotocélula de silicio. Bell montó la célula en una carcasa de cartón que se encajaba sobre el punto de mira de la cámara. A medida que cambia la intensidad de luz con la muestra y el modo de iluminación, la resistencia de la fotocélula varía inversamente. A través de los circuitos intermedios, estas variaciones modifican la lectura en el contador de milivolt. Tras varios experimentos, Bell consiguió construir una tabla de lecturas de manera que fuera posible interpretarlas inmediatamente en función del tiempo de exposición. (En el número de junio de 1977 de la revista *Popular Electronics* apareció diseñado un medidor de luz simple, aunque muy sensible, que podía construirse sin gran complicación con un fotorresistor de sulfuro de cadmio.)

Si se quiere obtener una buena reproducción de los colores naturales de un modelo, conviene atinar en la elección del tipo de película de color que se use; debe estar ajustada a la distribución de colores de la lámpara. Todas las lámparas parecen blancas para el ojo humano, pero la distribución real de intensidades a través del espectro visible depende de la temperatura de la superficie emisora de la lámpara. Una lámpara de luz blanca, de baja temperatura, tiene menos bajas frecuencias de luz visible (es decir, el final azul del espectro) que una lámpara de temperatura más alta. Las distintas películas de color se han ajustado de alguna forma para compensar esta diferencia de distribución del color de la luz blanca. Sin embargo, puede haber alguna discrepancia entre los colores reales de un modelo y lo que se ve en una fotografía en color. Se puede remediar la situación poniendo un filtro de color delante del proyector (o cualquier otra fuente de color). El libro de Kodak explica qué filtros deben emplearse.

Bell tiene una lámpara DAT de 400 watt en su proyector. La temperatura de la superficie del filamento emisor es tan alta que la luz semeja la luz solar en cuanto a la distribución de color. Por ello Bell utiliza película de color especial para la luz solar en vez de las películas que tienen un equilibrio de colores calculado para lámparas de tungsteno que funcionen a temperaturas superficiales inferiores.

Teresa Owens, antes de su graduación en el Reed College de Portland, Oregon, hizo un trabajo muy detallado y exhaustivo sobre el índice de enfriamiento del agua partiendo de varias temperaturas iniciales. Como ya dije en esta misma sección en noviembre de 1977, el agua caliente alcanza a veces el punto de congelación antes de lo que lo haga el agua inicialmente fría. El experimento es tan rico en variables que resulta difícil sustraerse a la tentación de averiguar sus causas.

Con un equipo experimental similar al mío, Owens registró la temperatura del congelador y la de varios puntos de un recipiente de agua depositado dentro del mismo. Sus resultados indican que el efecto se da probablemente, aunque puede perderse sin mayores dificultades con la variación de la temperatura del ambiente entre las distintas pruebas del experimento. De todas formas, de los datos obtenidos saca la conclusión de que los dos factores más importantes que determinan el efecto antedicho son: la temperatura inicial del ambiente y la circulación del aire sobre la parte superior del recipiente. En su opinión, el gradiente de temperatura dentro del agua y la masa perdida por evaporación no importan demasiado. Queda mucho por aprender sobre este experimento. Si algún lector aficionado llegara más allá en sus ensayos, me gustaría conocer sus conclusiones.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA PRODUCCION MUNDIAL DE CARBON

ENERGY: GLOBAL PROSPECTS 1985-2000. Workshop on Alternative Energy Strategies. McGraw-Hill Book Company, 1977.

ENERGY SUPPLY TO THE YEAR 2000: GLOBAL AND NATIONAL STUDIES. Workshop on Alternative Energy Strategies. The MIT Press, 1977.

SURVEY OF ENERGY RESOURCES 1976. World Energy Conference. United States National Committee of the World Energy Conference, 1977.

LA FORMACION DE MEMBRANAS CELULARES

MEMBRANE ASSEMBLY: SYNTHESIS AND INTRACELLULAR PROCESSING OF THE VESICULAR STOMATITIS VIRAL GLYCOPROTEIN. F. N. Katz, J. E. Rothman, D. M. Knipe y H. F. Lodish en *Journal of Supramolecular Structure,* vol. 7, págs. 353-370; 1977.

RAPID TRANSMEMBRANE MOVEMENT OF NEWLY SYNTHESIZED PHOSPHOLIPIDS DURING MEMBRANE ASSEMBLY. James E. Rothman y Eugene P. Kennedy en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 74, n.º 5, págs. 1821-1825; 1977.

MEMBRANE ASYMMETRY. James E. Rothman y John Lenard en *Science,* vol. 195, págs. 743-753; 25 de febrero de 1977.

SYNCHRONIZED TRANSMEMBRANE INSERTION AND GLYCOSYLATION OF A NASCENT MEMBRANE PROTEIN. James E. Rothman y Harvey F. Lodish en *Nature,* vol. 269, págs. 775-780; 27 de octubre de 1977.

LA OPTICA DE ONDAS GUIADAS

INTEGRATED OPTICS. P. K. Tien en *Scientific American,* vol. 230, n.º 4, págs. 28-35; abril, 1974.

SPECIAL ISSUE: LIGHTWAVE COMMUNICATIONS en *Physics Today,* vol. 29, n.º 5, págs. 23-60; mayo, 1976.

COMUNICACIONES OPTICAS. W. S. Boyle en *Investigación y Ciencia,* n.º 13, págs. 24-33; octubre, 1977.

LA ESTRUCTURA PROFUNDA DE LOS CONTINENTES

THE CONTINENTAL TECTOSPHERE. Thomas H. Jordan en *Reviews of Geophysics and Space Physics,* vol. 13, n.º 3, págs. 1-12; agosto, 1975.

LATERAL HETEROGENEITY OF THE UPPER MANTLE DETERMINED FROM THE TRAVEL TIMES OF MULTIPLE *ScS.* Stuart A. Sipkin y Thomas H. Jordan en *Journal of Geophysical Research,* vol. 81, n.º 35, págs. 6307-6320; 10 de diciembre de 1976.

COMPOSITION AND DEVELOPMENT OF THE CONTINENTAL TECTOSPHERE. Thomas H. Jordan en *Nature,* vol. 274, págs. 544-548; agosto 1978.

LAS TRAYECTORIAS DE LOS MOVIMIENTOS BRUSCOS DEL OJO

DERIVATION OF A MODEL FOR THE HUMAN EYE-POSITIONING MECHANISM. Gerald Cook y Lawrence Stark en *Bulletin of Mathematical Biophysics,* vol. 29, págs. 153-174; 1967.

NEUROLOGICAL CONTROL SYSTEMS: STUDIES IN BIOENGINEERING. Lawrence Stark. Plenum Press, 1968.

DYNAMIC OVERSHOOT IN SACCADIC EYE MOVEMENTS IS CAUSED BY NEUROLOGICAL CONTROL SIGNAL REVERSALS. A. Terry Bahill, Michael R. Clark y Lawrence Stark en *Experimental Neurology,* vol. 48, págs. 107-122; 1975.

TIME OPTIMAL BEHAVIOR OF HUMAN SACCADIC EYE MOVEMENT. Michael Clark y Lawrence Stark en *IEEE Transactions on Automatic Control,* AC-20, págs. 345-348; 1975.

GLISSADIC OVERSHOOTS ARE DUE TO PULSE WIDTH ERRORS. A. Terry Bahill, Frederick K. Hsu y Lawrence Stark en *Archives of Neurology,* vol. 35, págs. 138-142; marzo, 1978.

VIBRACIONES ACOPLADAS DE LAS CUERDAS DEL PIANO

DECAY RATES OF PIANO TONES. Daniel W. Martin en *Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 19, 4, págs. 535-541; julio, 1947.

TUNING PREFERENCES FOR PIANO UNISON GROUPS. Roger E. Kirk en *Journal of the Acoustical Society of America,* vol. 31, n.º 12, págs. 1644-1648; diciembre, 1959.

FUNDAMENTALS OF MUSICAL ACOUSTICS. Arthur H. Benade. Oxford University Press, 1976.

COUPLED PIANO STRINGS. Gabriel Weinreich en *Journal of the Marine Biociety of America,* vol. 62, n.º 6, págs. 1474-1484; diciembre, 1977.

LA CABEZA DEL CACHALOTE

PHYSICAL PROPERTIES OF SPERMACETI OIL IN THE SPERM WHALE. M. R. Clarke en *Journal of the Marine Biolocal Association of the United Kingdom,* vol. 58, n.º 1, págs. 19-26; febrero, 1976.

STRUCTURE AND PROPORTIONS OF THE SPERMACETI ORGAN IN THE SPERM WHALE. M. R. Clarke en *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom,* vol. 58, n.º 1, págs. 1-18; febrero, 1976.

TERMODINAMICA DE LA EVOLUCION BIOLOGICA

SELFORGANIZATION IN NON-EQUILIBRIUM SYSTEMS. G. Nicolis & L. Prigogine, John Wiley and Sons, New York, (1977).

A COOPERATIVE EFFECT WITH SIGNIFICANCE IN BIOLOGICAL EVOLUTION. J. Wagensberg en *Lectures Notes in Physics,* vol. 84, p. 350. Springer-Verlag. New York, 1978.

ENTROPY BALANCE IN BIOLOGICAL DEVELOPMENT AND HEAT DISSIPATION IN EMBRYOGENESIS. D. Lurié y J. Wagensberg en *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics* 4, 120; 1979.

NON-EQUILIBRIUM THERMODYNAMICS AND BIOLOGICAL GROWTH AND DEVELOPMENT. D. Lurié y J. Wagensberg en *Journal of Theoretical Biology* (en prensa).

JUEGOS MATEMATICOS

LOXODROMIC SEQUENCES OF TANGENT SPHERES. H. S. M. Coxeter en *Aequations Mathematicae,* vol. 1. n.º 1/2, págs. 104-121; 1968.

EXCURSIONS IN GEOMETRY. C. Ogilvy. Oxford University Press, 1969.

TALLER Y LABORATORIO

PHOTOGRAPHY THROUGH THE MICROSCOPE. Eastman Kodak Company, 1974.

ADVENTURES WITH A MICROSCOPE. Richard Headstrom. Dover Publications, Inc., 1977.

Taller y laboratorio

Una extraña relación: las chimeneas y las puntas de los lápices se fracturan de la misma forma

Jearl Walker

La relación entre el derrumbamiento de una chimenea y la rotura de la punta de un lápiz está muy lejos de ser evidente. A pesar de lo cual vamos a dedicar la mayor parte del artículo de este mes a demostrar que existe una similitud muy clara entre ambos hechos. En el resto de la sección acometeremos un tema muy distinto: un ingenioso montaje para acoplar un telescopio a una calculadora de bolsillo, de manera que los cambios de ángulo del telescopio se reflejen en la calculadora, y así podamos leer directamente en la pantalla de la misma el ángulo a que está orientado el telescopio en cada momento.

Si el lector presenciara alguna vez el derribo de una vieja chimenea (de las altas, autosustentadas y del tipo cilíndrico), le sugeriría que se fijase con detalle en uno de los lados en el momento en que la torre empiece a caer. En los métodos normales de demolición, se rompe una sección de la base con dinamita o bien con un bulldozer, forzando a la torre a caerse hacia un lado. Cuando haya alcanzado una inclinación de unos 45 grados, aparecerá probablemente una grieta lateral en su mitad. Como consecuencia, la parte de arriba comienza a descender más lentamente que la parte de abajo, y las dos forman más o menos una *V* abierta. La razón de la fractura se debe a que, conforme la chimenea empieza a caer, la parte superior tiene necesariamente una aceleración hacia el suelo mayor que la parte de abajo. Las chimeneas no suelen ser tan resistentes como para soportar, a la vez, la tensión de flexión y la aceleración; por tanto, se rompen.

Ernest L. Madsen, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, ha examinado recientemente la mecánica del derrumbamiento de una chimenea. Analizó en primer lugar las fuerzas que actúan sobre toda la torre, una vez iniciada la demolición. Dichas fuerzas son tres: su propio peso (que actúa en el centro de masas), una fuerza de reacción hacia arriba procedente del terreno y una fuerza de fricción (horizontal) procedente también del terreno. La combinación de estas fuerzas determina que la chimenea acelere su movimiento hacia el suelo y gire verticalmente sobre la base.

Madsen considera luego la sección inferior de la chimenea, que abarca desde la base hasta un punto arbitrariamente situado a lo largo de su longitud. Esta sección tiene una aceleración angular alrededor de la base durante toda la caída, debido a que actúan sobre ella tres momentos. Uno de los cuales tiene su origen en el propio peso de la sección. Los otros dos se deben a que la sección inferior tiene que arrastrar, en su rotación, a la sección superior; de estos dos momentos, uno se debe a las fuerzas de cizallamiento resultantes cuando la sección superior intenta deslizarse sobre la parte superior de la sección inferior. Por último, la sección inferior está sometida a un momento flector, ya que la parte superior tiende a retrasarse en la rotación y, por tanto, a doblarse hacia atrás.

Exceptuando la base y la cima de la chimenea, toda sección inferior, cualquiera que sea su longitud, estará sometida a la acción de un momento flector que forzará la separación entre la sección superior e inferior. De acuerdo con los cálculos, el momento flector es máximo a una altura de un tercio de la longitud total de la chimenea. Cuando ésta comienza a caer y a depender de una aceleración angular alrededor de la base, los momentos flectores a lo largo de toda su longitud van haciéndose progresivamente mayores en función del tiempo; puede llegarse a que dicho momento, a la altura de un tercio de la longitud, sea lo suficientemente grande como para romper la chimenea, de suerte que los dos tercios superiores se separen y retrasen respecto al tercio inferior.

Los resultados de Madsen se cumplen en una chimenea uniformemente cilíndrica. En una chimenea en la que su sección disminuya con la altura, o tenga cualquier otra forma, el máximo del momento flector no se encontrará a un tercio de la altura, sino en cualquier otro punto de su longitud. Si se le presenta la ocasión de ver el derrumbamiento de una chimenea, intente fotografiarlo. Puede resultar de particular interés filmar el movimiento a cámara lenta; podrá contemplarse así la grieta que comienza a aparecer en la parte inferior y se va propagando a lo ancho de la chimenea. (Hay que estar muy alerta. Recientemente presencié un derrumbamiento del tipo que estamos estudiando y por poco me alcanzan los ladrillos que salieron despedidos cuando la chimenea llegó al suelo.)

La grieta no se propaga directamente a través del ancho de la chimenea. En 1940, Francis P. Bundy explicó el proceso de ruptura, no sólo como consecuencia de la tensión flectora, sino también por el acompañamiento de la compresión de la chimenea sobre el lado que tira del resto. Según parece, la flexión provoca que la línea de máxima compresión descienda a medida que la grieta se propaga por aquel lado.

Algunos cálculos de Bundy sugieren que si una chimenea no se rompiera durante su caída, ocurrirían cosas realmente extrañas. La base de la chimenea podría saltar hacia arriba, casi al final de la caída, dado que la torre está rotando aproximadamente sobre su centro de gravedad. Pero estos resultados no son los previsibles en los cálculos de Madsen. Quizás el lector quiera observar la base de una chimenea que está cayendo sin romperse, para comprobar realmente si su base se eleva.

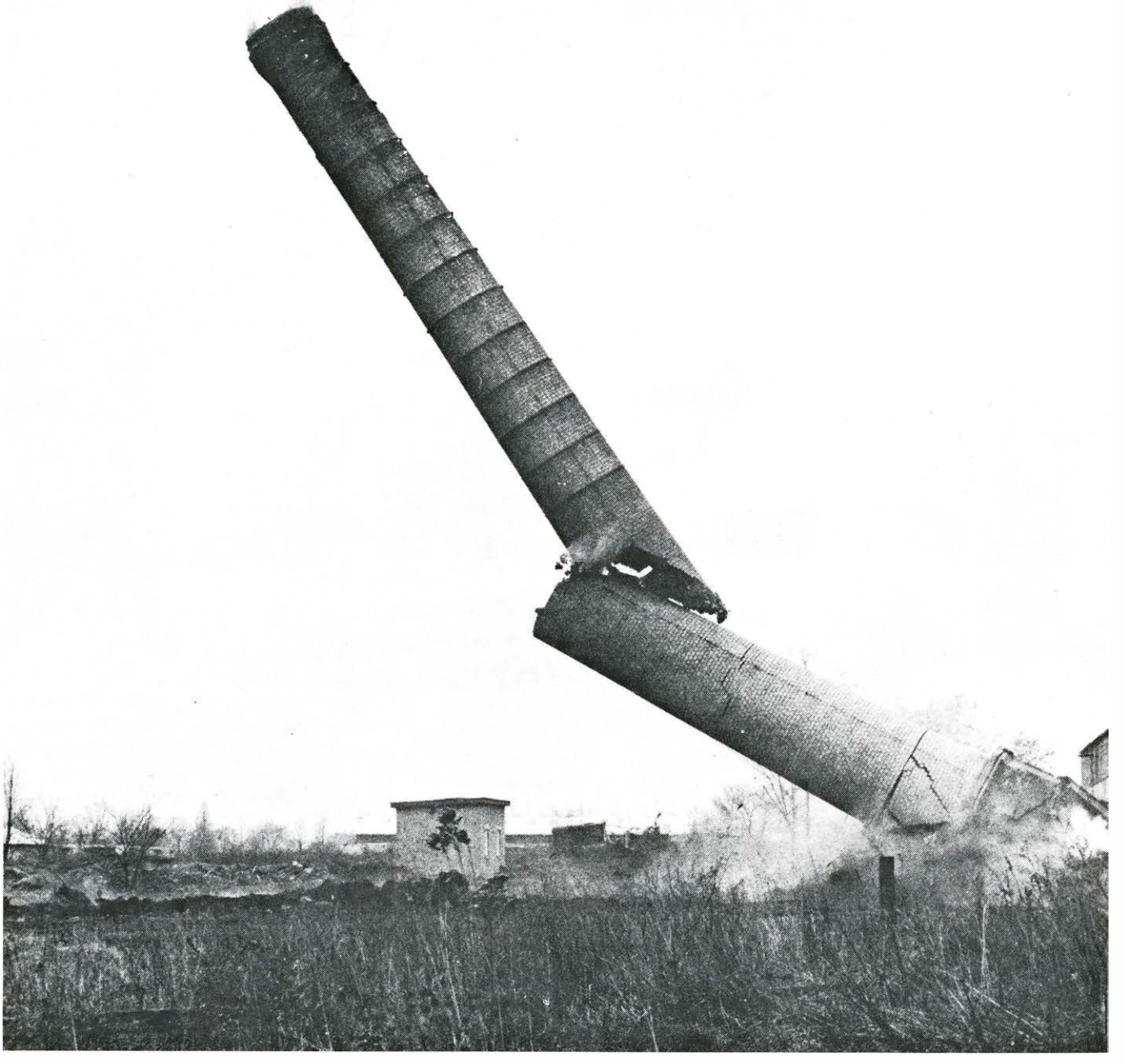
La demolición de una chimenea puede revelarnos otros dos aspectos interesantes. Se trata el primero de otro punto de ruptura, el cual puede desarrollarse cerca de la base en virtud del cizallamiento que provoca la parte superior de la chimenea al pretender deslizarse sobre la parte inferior. Algunas fotografías de derrumbamiento de chimeneas muestran con claridad esa nueva fractura; la torre se rompe por dos sitios.

El otro aspecto a destacar se refiere a la base de la chimenea; ésta puede deslizarse durante la caída. Había supuesto que dicho deslizamiento ocurría en dirección opuesta a la caída; pero la realidad suele ser diferente. La base se mueve en la misma dirección que la chimenea, siendo arrastrada a lo largo de dicha dirección cuando la chimenea está en una posición en la que su vector cantidad de movimiento ha adquirido una cierta componente longitudinal. De acuerdo con los trabajos de Madsen, hay más probabilidad de que la base se deslice cuando la chimenea haya recorrido en su caída por lo menos 50 grados. Mas allá de este ángulo, la cantidad de fuerza de rozamiento que sería nece-

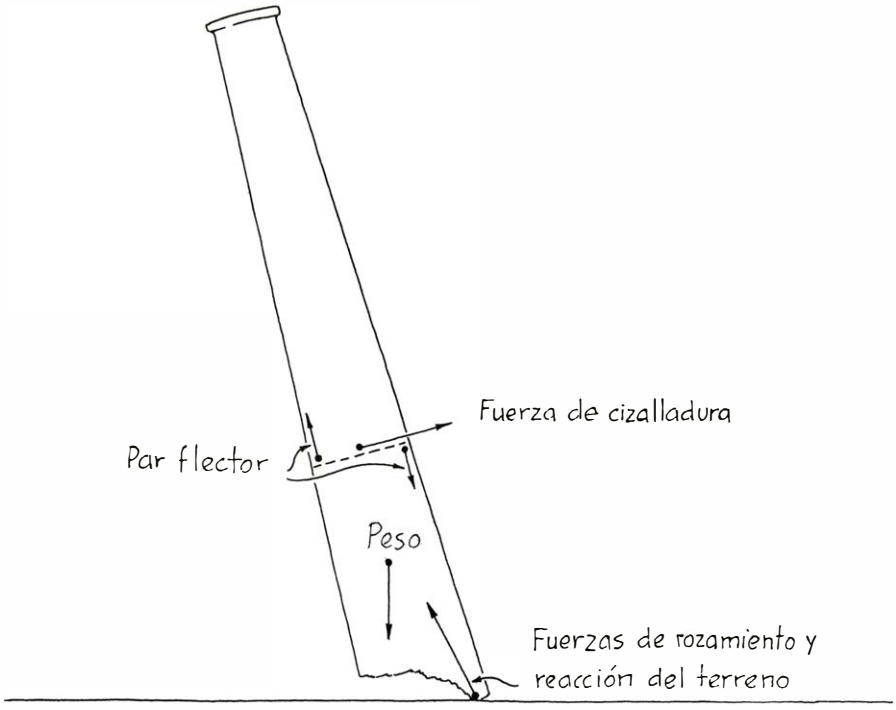
saria para afirmar la base en su sitio resultaría prácticamente infinita.

El derrumbamiento de una chimenea puede representarse, con algunas imperfecciones, por un lápiz sin afilar, situado verticalmente, con la punta hacia abajo, sobre una superficie horizontal, al que dejamos caer. El extremo inferior quedará desplazado en la dirección en que cae el lápiz, aunque este movimiento es más complejo que un simple resbalón. Dicho extremo recorre primero un breve intervalo en dirección opuesta a la de caída; puesto que el lápiz rebota sobre la superficie, el extremo da un salto todavía mayor en la dirección de caída. El rozamiento estático sobre el extremo inferior del lápiz no basta para impedir que dicho extremo se deslice a lo largo de la superficie a medida que el lápiz tiende a girar sobre su centro de gravedad durante su caída. El último movimiento en la dirección de la caída proviene de que el extremo inferior es arrastrado en dicha dirección cuando el lápiz en su caída adquiere un momento cinético horizontal.

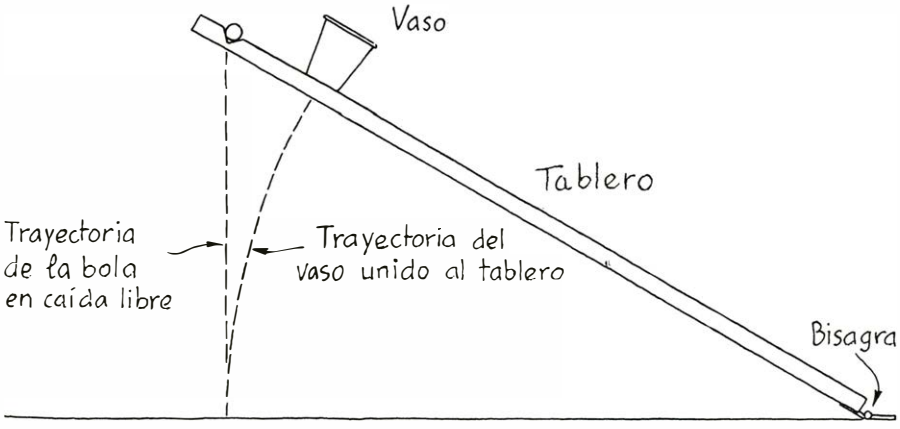
Madsen me ha sugerido un montaje muy simple con piezas sueltas (como las de muchos juguetes de construcción de casas y castillos), con el que simular la flexión de una chimenea al derrumbarse. Hay que reunir piezas cilíndricas de madera con un agujero en el medio. Para simular bien una chimenea, es necesario formar una torre con una treintena de las piezas referidas. Se ajusta estrechamente un palito al agujero central de una de las piezas, que será la que quede en la base. Se afila un extremo del palito para que pueda clavarse firmemente en un trozo de esponja, que colo-



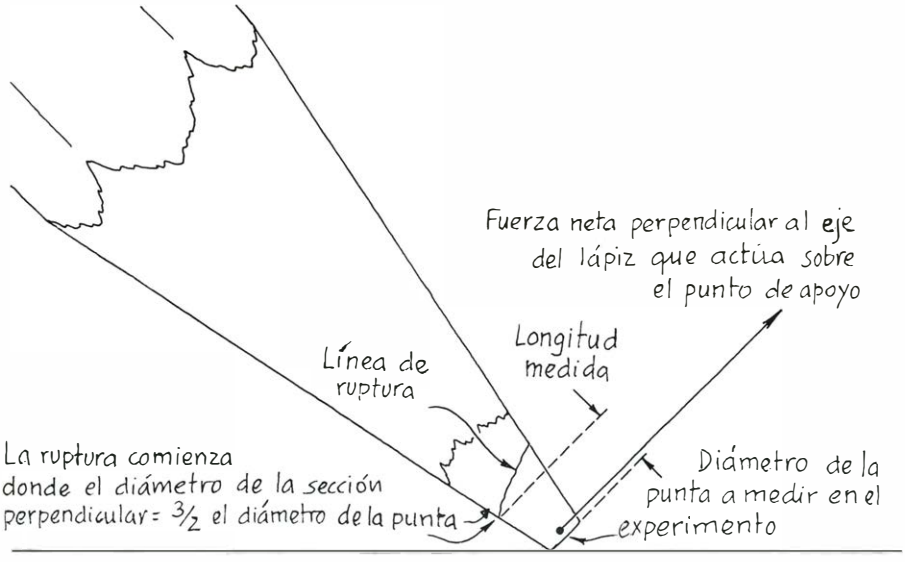
Una chimenea se rompe al caer



Fuerzas que actúan sobre la sección inferior de la chimenea durante el derrumbamiento



Aparato para demostrar el efecto de la aceleración durante la caída



Fuerzas que hacen que la mina de un lápiz se rompa

caremos sobre la mesa. Del otro extremo del palito, que quedará hacia arriba, ataremos una banda elástica, a ser posible de látex, que a su vez la haremos pasar a través de los agujeros centrales de las piezas. Quizás se requieran varias bandas de éstas, enlazadas entre sí, para alcanzar la cima de la chimenea. Atemos la última banda a otro palo, más pequeño, que cruzaremos encima de la pieza cilíndrica situada en la parte superior de la columna. Los cilindros deben quedar alineados para que la "chimenea" se mantenga derecha; no debe enredarse la banda de goma por dentro de los cilindros. Ajustaremos la tensión de la banda para que se incline la chimenea, si se le empuja por uno de los lados.

El extremo inferior del palito está clavado en la esponja; ésta, a su vez, se halla pegada, o unida de alguna otra manera, a un tablero mayor colocado encima de la mesa. Cuando empujamos suavemente la chimenea por un lado, cae torciéndose hacia atrás, más o menos como lo haría una chimenea real. La base no se desliza, debido a la fuerza de fricción existente entre el palito y la esponja.

Como el derrumbamiento es bastante rápido, una fotografía de la caída resulta más representativa y útil que la mera observación. Madsen sugiere que, si se toma una película de la caída, se haga por lo menos con una velocidad de 36 exposiciones por segundo. Si no se dispone de un equipo idóneo, puede sacarse una instantánea de la chimenea al caerse con una luz de estroboscopio. Apague la luz de la habitación, abra el objetivo de la cámara, haga que la chimenea empiece a caer y entonces encienda la luz de estroboscopio durante la caída. Después, y antes de encender la luz de la habitación, cierre el objetivo de la cámara.

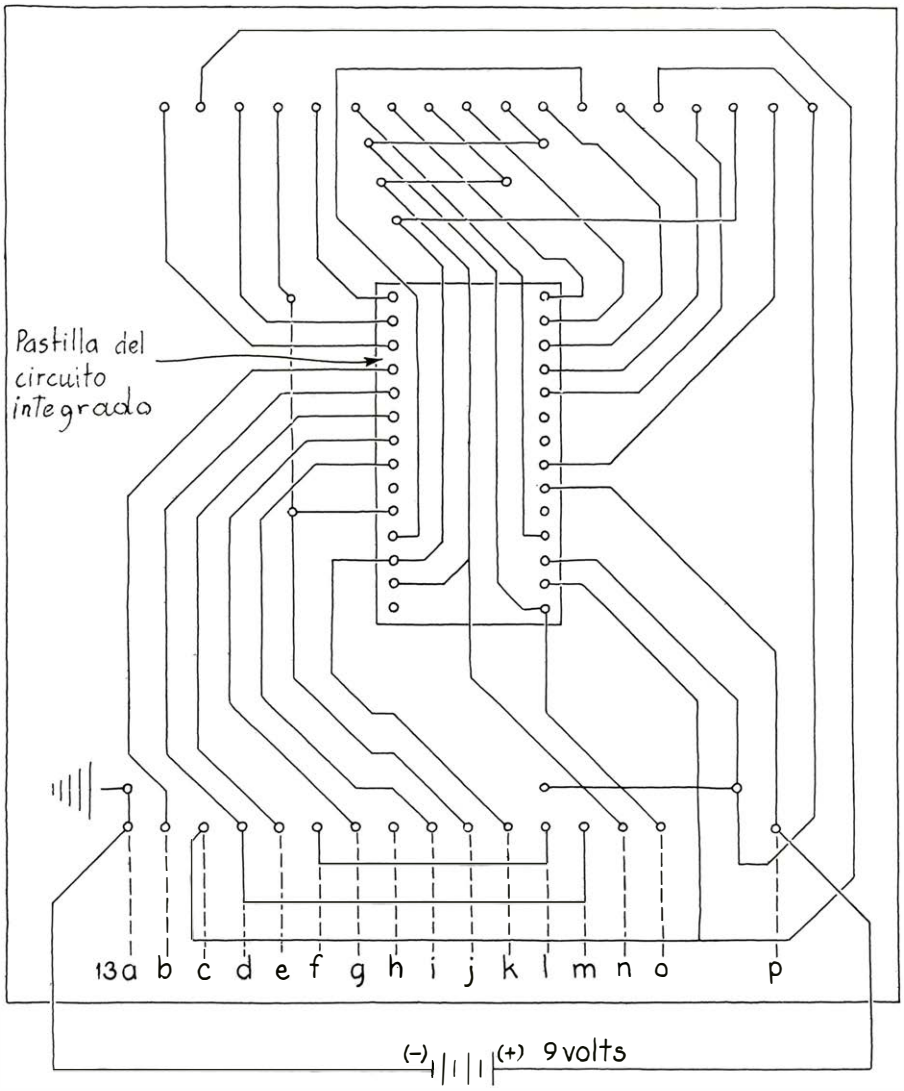
En las clases prácticas de física se da una demostración relacionada con el derrumbamiento de las chimeneas; constituye un ejemplo ilustrativo de cómo la gran aceleración de la parte superior de la chimenea impide su agrietamiento. Se une un tablero por medio de unas bisagras a una base, instalada sobre la mesa. El otro borde del tablero se mantiene en alto por medio de un soporte, de suerte que el tablero forme un ángulo de unos 35 grados con la mesa. Se pega un pequeño vaso de papel en la parte superior del tablero, cerca de su borde. Más cerca todavía del borde, y en un soporte, se coloca una bola metálica pequeña. El soporte puede consistir en una breve ranura abierta en el tablero. La situación correcta de estos elementos debe ser tal que cuando se retire el soporte, la bola se separe del tablero (ya que la acelera-

ción con la que desciende el tablero es mayor) y caiga dentro del vaso de papel.

Podría esperarse que la bola y el tablero cayeran con la misma velocidad; en cuyo caso, ambos alcanzarían la mesa a la vez y, por tanto, la bola nunca caería dentro del vaso. Pero, en cuanto se retire la varilla de apoyo, la bola adquirirá un movimiento de caída libre. Es decir, comienza a caer con un movimiento uniformemente acelerado, con la aceleración normal de la gravedad, que tiene un valor de unos 9,8 metros por segundo cada segundo. El tablero, por su parte, está sometido a una aceleración angular alrededor de la bisagra, ya que su propio peso crea un par que actúa sobre el centro de masas. Este movimiento hace que el borde superior del tablero se mueva hacia abajo con una aceleración mayor que la que provoca la gravedad. Esta aceleración no dependerá de la longitud del tablero (ya que el centro de gravedad se hallará siempre en el punto medio, cualquiera que sea su longitud, y el par provocará la misma aceleración en el borde superior); sí dependerá, en cambio, del ángulo que forme el tablero con el plano de la mesa. Conforme el tablero cae y, por tanto dicho ángulo va disminuyendo, la aceleración del borde superior va aumentando hasta un valor de 1,5 veces la aceleración de la gravedad. Se sigue de ello que el tablero con el vasito llegan a la mesa antes que la bola. Si, al inicio de la prueba, cada elemento que en ella interviene está situado en su lugar correcto, la bola caerá limpiamente dentro del vaso.

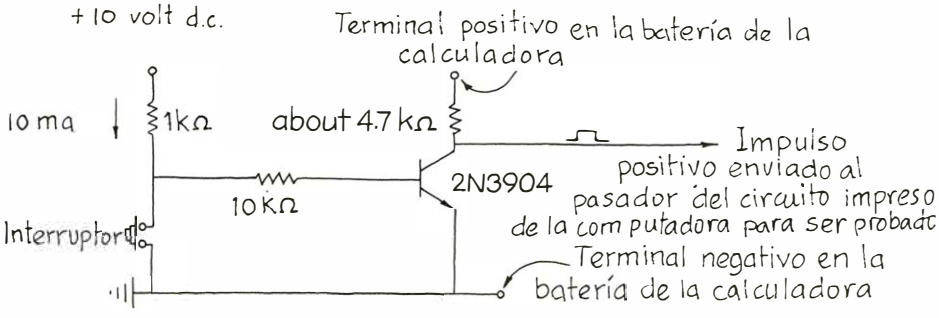
Recientemente, Albert A. Barlett, de la Universidad de Colorado en Boulder, ha descrito una modificación en el diseño del experimento anterior. Barlett fija un peso en el borde superior del tablero, justo por encima de la ranura o muesca donde situamos la bola. Se podría pensar que dicho peso adicional provocaría que el tablero descendiera aún más deprisa, pero lo que ocurre en realidad es exactamente lo contrario. La masa adicional del tablero disminuye su aceleración, debido a que el par no puede acelerar de igual manera al tablero y a la masa adicional como lo haría al tablero solo. Si basta con la masa adicional, el tablero no llega a la mesa antes que la bola y, en obvia consecuencia, la bola no caerá en el vaso. Incluso en determinadas circunstancias, la aceleración del tablero es tan pequeña que la bola permanece en contacto con él al principio de la caída y adquiere una velocidad horizontal antes de separarse finalmente. La bola pasa por encima del vaso, en lugar de aterrizar dentro de él.

Veamos ahora qué ocurre con el lá-



Terminales (pares)	Función	Terminales (pares)	Función
13 e y f	0	13 g y n	9
13 c y d	1	13 a	terminal negativo
13 c y e	2	13 p	terminal positivo
13 c y g	3	13 e y k	+/- (cambio de signo)
13 d y o	4	13 k y n	
13 e y o	5	13 c y i	+
13 g y o	6	13 i y o	-
13 m y n	7	13 g y h	punto decimal
13 e y n	8	13 h y i	=

Circuito y conexiones de los terminales de una calculadora modelo Concept V



Circuito para probar los terminales de una calculadora

piz. Como el lector sabe perfectamente, la punta del lápiz acaba por romperse si lo apretamos con fuerza. La punta se rompe debido a la tensión de flexión, de forma muy parecida a lo que ocurre cuando una chimenea se derrumba.

¿Se ha fijado alguna vez que todas las puntas de lápiz rotas tienen más o menos la misma longitud? Donald H. Cronquist, de San José, ha observado este hecho y ha diseñado un modelo sencillo para su explicación. Excluye los defectos de fabricación y el posible daño sufrido al sacarle punta como la causa primaria de la uniformidad en las rupturas. Los defectos de fabricación serían totalmente aleatorios en cada lápiz, y el posible daño causado al sacarle punta podría detectarse mirándola atentamente. Parecería más probable que la punta se quebrase por su lado posterior, en un lugar donde la flexión excediese la fuerza de tensión de la mina. La fuerza de tensión es una medida de la tensión máxima (fuerza por unidad de área) que puede soportar un determinado material sin doblarse mientras la tensión trata de estirarlo. El material se fractura cuando la tensión supera este valor máximo. (Por otra parte, si el material se comprime, cuando la tensión llega a sobrepasar la fuerza de compresión de dicho material, éste colapsa.)

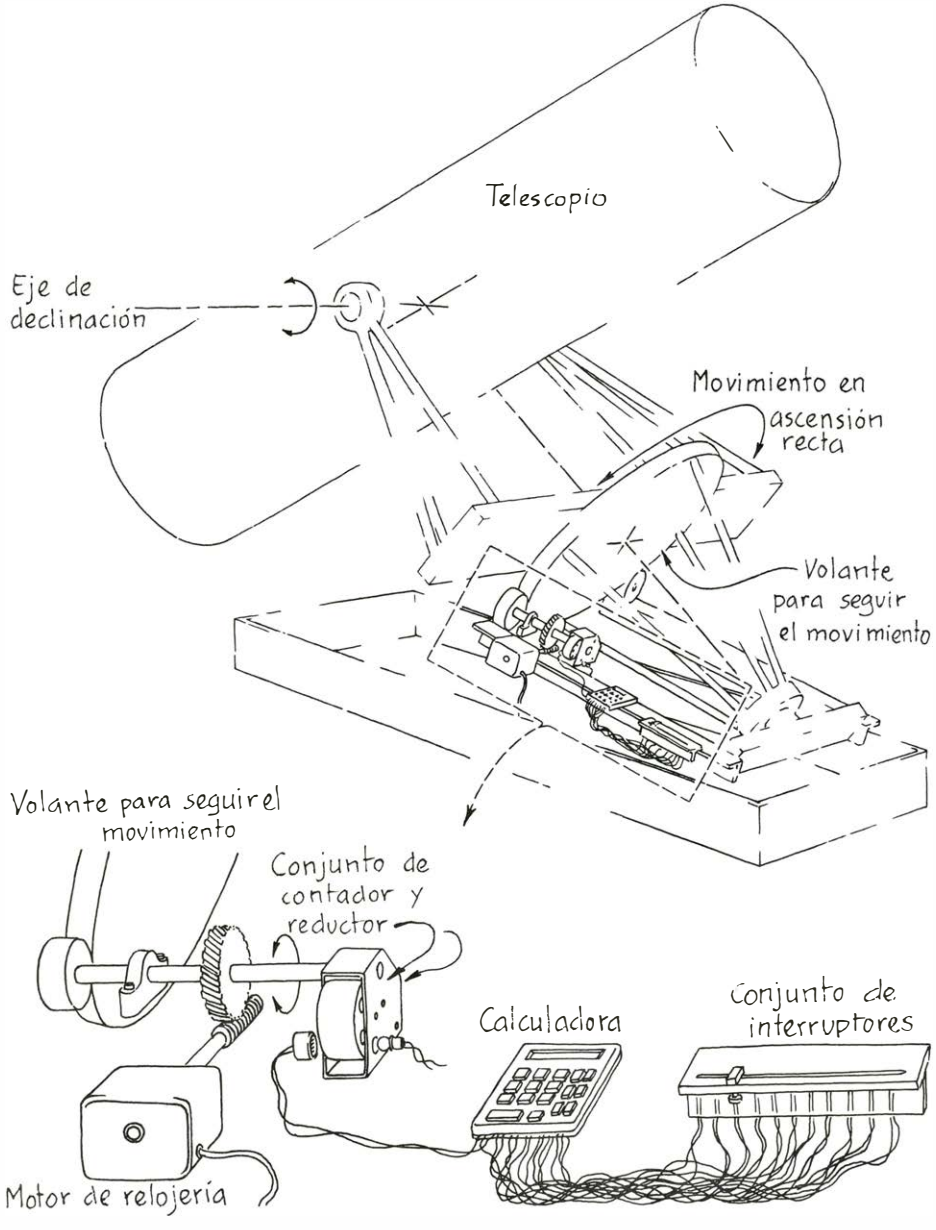
Al escribir con un lápiz, las fuerzas que ejercen el papel y la mesa sobre su extremo crean una tensión en la punta. En particular, aparece una fuerza neta perpendicular al eje del lápiz que trata de doblar la punta, comprimiendo el lado superior y alargando el lado inferior. Las tensiones aparecen a través de una sección transversal de la punta. En un material frágil, como una mina de lápiz la tensión máxima de alargamiento (la fuerza de tensión) suele ser menor que la tensión máxima de compresión (la fuerza de compresión). Por tanto, cuando se alcance una tensión límite, es más probable que se esté en el lado inferior de la punta.

Al sacar mina a un lápiz, no suele conseguirse una punta perfectamente afilada y cónica. Se pierde cierta longitud. Cronquist generalizó sus cálculos midiendo la distancia desde el punto de escritura hacia arriba, en función de la longitud perdida. Tales cálculos indican que la flexión alcanza un máximo en un lugar situado a una distancia del punto de escritura igual a la mitad de la longitud perdida. Debido a que el sacaminas afila la punta dándole forma cónica, se deduce que la flexión alcanza un máximo cuando el diámetro transversal mide 1,5 veces el diámetro del extremo de escritura (una razón de 3 a 2). Este es el punto de ruptura más probable para un lápiz idealizado.

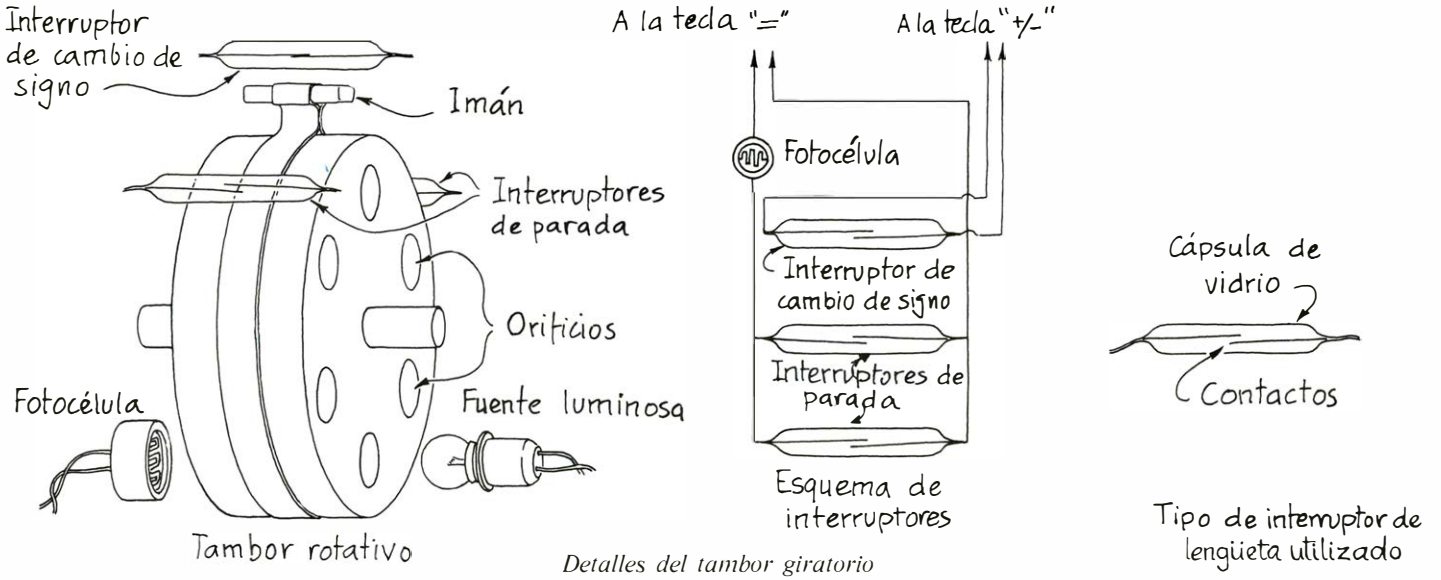
Para un extremo menos afilado, el punto de ruptura es mayor; y ello porque, con un extremo de escritura de diámetro superior, la flexión máxima se encuentra más arriba en el cono formado por la punta. Sin embargo, como la punta se rompe característicamente al poco de haber afilado el lápiz, las puntas rotas serán, por lo general, cortas y de longitudes más o menos iguales. La fuerza y la tensión reales requeridas para quebrarla variarán de un lápiz a otro, según la dureza de la mina y el ángulo del cono de la punta, pero la flexión máxima todavía debería darse en el lugar teórico determinado por la relación de 3 a 2 entre los diámetros.

El análisis no se extiende a los lápices romos. En uno de éstos, el punto de ruptura estaría teóricamente en el interior de la envoltura de madera. Además, puede no darse la relación de 3 a 2 entre los diámetros, que indica el punto más probable de ruptura. El análisis no tiene en cuenta las variaciones debidas a la fabricación y afilado; no considera tampoco la variedad de fuerzas que actúan en el lápiz durante el uso. Por último, el análisis ignora la fuerza neta paralela al eje del lápiz, concentrándose, por contra, en la fuerza neta perpendicular al eje. No obstante, la fórmula sí predice con buena aproximación las medidas de las minas rotas.

He comprobado el análisis afilando y rompiendo sistemáticamente las puntas de varios lapiceros. Los diámetros y longitudes de las puntas rotas (medidas desde el punto de escritura al lugar donde empezó a quebrarse) fueron medidos con un micrómetro. Al principio, no intenté normalizar la rotura. Los resultados no fueron concluyentes porque



Colocación de una calculadora según el modelo de John y Dave Guerra para registrar el movimiento lateral de un telescopio



Detalles del tambor giratorio

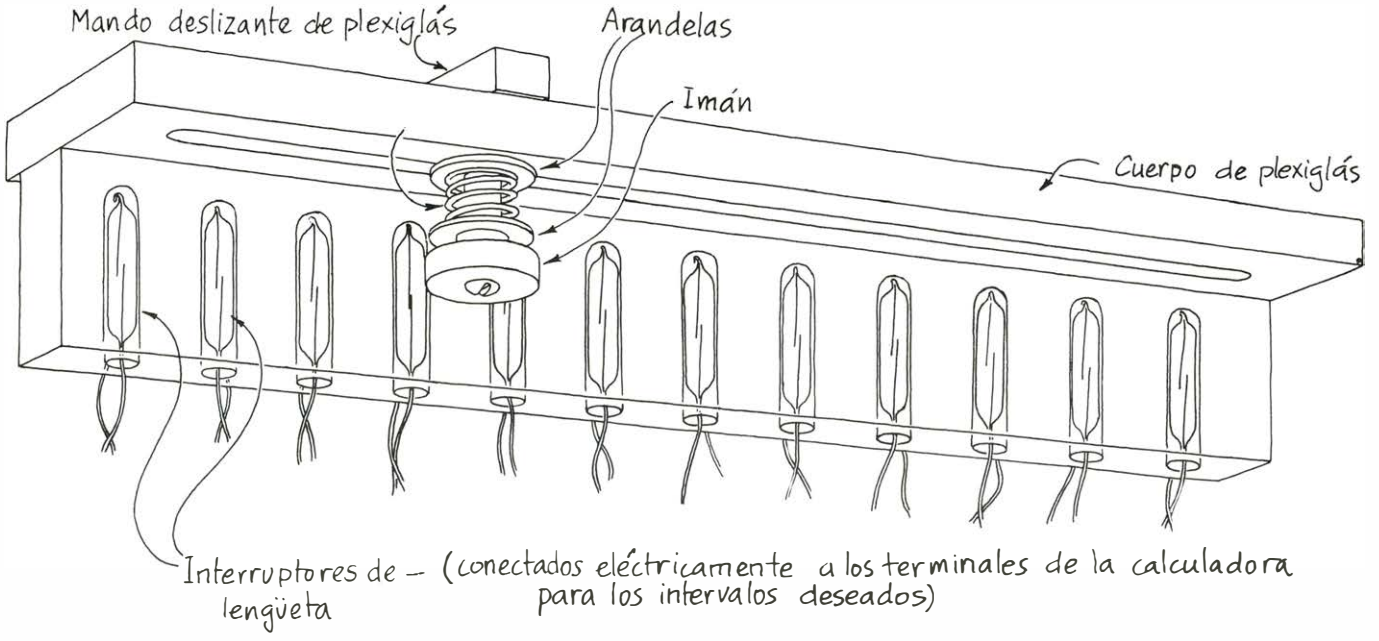
las longitudes de las puntas rotas variaban considerablemente, aun cuando los diámetros de la punta eran los mismos.

Me esforcé luego por hacer la rotura más consistente. Al sacar punta, giraba el lápiz al tiempo que hacía lo propio con el sacaminas con el fin de obtener un pulimento uniforme alrededor de la punta del lapicero. Sujeté luego el lápiz de la siguiente manera: la punta estaba en un determinado lugar de la mesa y mi mano se mantenía justo encima de un amortiguador de goma que usaba como referencia de altura. Mantuve así el ángulo del lápiz con el mantel aproximadamente igual (unos 45 grados), durante todo el tiempo. Con el lápiz colocado en esta posición, apretaba hacia abajo hasta que la punta saltaba (hay que tener cuidado de que la mina no nos salte a un ojo). Si la rotura se producía arriba en el revestimiento de madera, desechaba el dato.

Las puntas se rompían casi siempre de la misma forma, empezando por la parte inferior de la mina, y propagándose hacia arriba y hacia fuera del punto de escritura, hasta alcanzar la parte apical. Ni Cronquist ni tampoco yo sabemos exactamente por qué se propaga la rotura de esta manera, aunque el modelo es similar al de las chimeneas que se caen.

Representé las medidas de las minas rotas en función de los diámetros de los puntos de escritura. Para trazar una línea recta a través de los puntos de los datos, usé una calculadora de bolsillo, capacitada para regresiones lineales. Teniendo ambos ejes en el gráfico la misma escala, la pendiente de la línea era de 2,5. Con mi sacapuntas, que afila los lápices hasta conseguir un ángulo de punta de unos 12 grados, la inclinación de la línea debería ser, según la teoría de Cronquist, de 2,2. Teniendo en cuenta las diferencias de fabricación de los lápices, los resultados experimentales resultaron sorprendentemente similares a los teóricos.

Se puede seguir recogiendo datos acerca de las medidas de las puntas rotas, investigando con lápices de diferente dureza y diámetro. ¿Acierta la teoría de Cronquist cuando afirma que no hay ningún factor que influya especialmente en las longitudes de las puntas rotas? Se puede ver también como varía la longitud a medida que lo hace el ángulo entre el lápiz y la mesa. Para cual-



Montaje del interruptor deslizante

quiera de estas variaciones, es necesario recoger muchos datos, representarlos y determinar luego el mejor ajuste de una línea recta a través de ellos. Cabe esperar que la teoría no funcione tan bien cuando la punta del lápiz está muy afilada o muy poco, y que los datos se reflejen mejor con una línea curva.

Los mecanismos para indicar la posición de un telescopio son a veces complejos y difíciles de leer en la obscuridad. John y Dave Guerra, de Ludlow, Massachusetts, han diseñado un indicador de posición que utiliza el circuito integrado de una calculadora de bolsillo. El aparato es barato, muy preciso y fácil de leer en la obscuridad.

No sirve cualquier calculadora. Se puede encontrar una apropiada de la siguiente forma: después de ponerla en funcionamiento, se apretará la tecla "más"; luego la tecla "1". Se pulsará entonces la tecla "igual" (=) varias veces. La calculadora deberá añadir 1 a una suma sucesiva, cada vez que se pulsa la tecla de igual. Se pulsará entonces, una vez, la tecla "más-menos" (esta tecla es la que hace que la calculadora cambie de signo) y varias veces la de "igual". La calculadora deberá restar, ahora, 1 de la cifra cada vez que se pulse la tecla de "igual". Si la calculadora opera de acuerdo con este programa, sirve para el diseño de Guerra.

Los Guerra se propusieron acoplar el eje giratorio del telescopio a la pantalla digital de la calculadora, de manera que ésta diera la orientación del telescopio. El acoplamiento se realiza a través de varios pasos. El telescopio de los Guerra tiene un eje polar con una relación de engranajes de 10:1. Para conseguir una capacidad de rotación neta de 1200 veces la rotación del telescopio, adaptaron un mecanismo de relojería de reducción con una relación de 120: 1. En el cilindro final del mecanismo de relojería hicieron seis agujeros, dispuestos de suerte que giraran a través de un rayo de luz dirigido a una fotocélula. Cada vez que el último cilindro del mecanismo daba una vuelta, el rayo incidía en la fotocélula seis veces. Una rotación polar completa del telescopio producía, por tanto, 7200 pulsaciones de luz (6 x 1200). Se conectó la fotocélula a la tecla "igual" de la calculadora; y así cada pulsación luminosa accionaba este botón y añadía otro uno (o cualquier otra cantidad que se deseara) a la cifra ya existente. Los Guerra construyeron dos aparatos de éstos, uno para el eje de ascensión recta del telescopio y otro para el eje de declinación.

Para usar estos aparatos, los Guerra orientan primero el telescopio hacia una estrella de posición conocida, introduciendo en la calculadora las coordenadas de la estrella, obtenidas de un atlas de estrellas. Giran luego el telescopio sobre su eje hacia otra estrella, cuya posición quieren determinar. La rotación dispara las fotocélulas, que, a su vez, ponen en marcha la calculadora. Se pueden leer entonces las nuevas coordenadas en las respectivas pantallas.

Podemos determinar de antemano el intervalo de la calculadora (es decir, cuánto avanza ésta con cada impulso de luz en la fotocélula). Supongamos que queremos que sea 0,2. Cada impulso incrementará entonces la lectura en 0,2. Una rotación completa del telescopio, que corresponde a 24 horas, o 1440 minutos, mostraría una lectura de 1440. En otras palabras, la lectura está en minutos de tiempo, lo cual sería útil para la ascensión recta. Si se prefiere minutos de arco (adecuados para la declinación) se debería fijar una cantidad de 3.

Los Guerra usaron una calculadora Concept V en su experimento. El lector puede encontrar otras marcas que le vengan mejor. Si se recurre a otra calculadora, hay que repetir el procedimiento de los Guerra para determinar cómo están acoplados los terminales (pins) del circuito con las teclas de la calculadora. Con el modelo Concept V, los Guerra pudieron determinar, por medio de inspección visual, cómo se conectaban los interruptores situados detrás de cada tecla con los cables de la placa del circuito integrado y cómo se conectaban, a su vez, los cables a los terminales situados detrás del tablero.

Pero, la inspección visual puede resultar demasiado difícil con algunas calculadoras. En cuyo caso habría que probar los terminales con un aparato que consiste en un transistor *n-p-n*, nada caro, algunas resistencias y un interruptor. Hay que elegir la resistencia de acuerdo con el interruptor, de manera que circulen a través de la resistencia unos 10 miliampère cuando se cierre el interruptor. Por ejemplo, si se ponen 10 volt a través del interruptor (como en la ilustración inferior de la página 111) la resistencia deberá ser de 1000 ohm. Al apretar el interruptor, llega una señal al transistor, produciendo una señal lógica positiva que será alimentada desde la batería del calculador al terminal bajo investigación. Con una calculadora que responda a señales lógicas negativas, hay que intercambiar las posiciones del interruptor y su resistencia. Algunas calculadoras funcionan de otra forma; no tienen masa común en un terminal, sino que están diseñadas de suerte que, al apretar una tecla, cortocircuitan dos terminales para que lleven a cabo el proceso deseado. Pero en todos los modelos de calculadora hay que realizar las pruebas con mucho cuidado a fin de evitar que el aparato se estropee.

Si giramos el telescopio en dirección opuesta a lo que se considera el sentido positivo, la calculadora debe recibir la instrucción de restar cada impulso que reciba de la fotocélula. Los Guerra diseñaron un mecanismo simple que accionaba la tecla "más-menos" de modo que se realizara la operación adecuada. Una banda fina de metal (que actúa como un embrague de fricción) alrededor del cilindro giratorio porta un imán pequeño. Alrededor del imán hay tres interruptores de lengüeta. Al girar el telescopio en sentido positivo, el imán se apoya en uno de los interruptores de lengüeta; de ello resulta que, a cada impulso de luz, la calculadora suma. Cuando el telescopio cambia de dirección, la fricción determina que la banda de metal gire con el cilindro; y, por tanto, el imán se sitúa más allá del interruptor central y descansa sobre el tercero de ellos. Cuando el imán atraviesa el interruptor central, el campo magnético cierra transitoriamente el interruptor al forzar la unión de las dos lengüetas. Durante ese breve cierre, el interruptor envía un impulso a la calculadora para cambiar los signos. Cuando el imán vuelve a reposar, esta vez sobre el tercer interruptor, los impulsos de luz activan de nuevo la fotocélula y la tecla "igual", pero ahora la calculadora sustrae el intervalo preestablecido de la cantidad precedente. Los dos interruptores exteriores se hallan en paralelo entre sí, y ambos en serie con la fotocélula, para evitar el registro de impulsos erróneos durante el cambio de dirección.

Los Guerra construyeron también un mecanismo de arranque que se ocupaba de las operaciones iniciales de activación de la tecla "más" y de fijación de los intervalos deseados. Consistía en una barra deslizante de plexiglás unida a un resorte tenso y montado con un pequeño imán. Debajo del imán se sitúa otra capa de plexiglás que contiene varios interruptores de lengüeta. Cada interruptor está fijado a las teclas de la calculadora, que deberían normalmente apretarse para habilitar la calculadora para su uso específico. A la hora de preparar la calculadora, se deslizará la barra sobre los interruptores. El último interruptor, que actúa como parada para el imán, activa las células luminosas y una bombilla intermitente de 3 volt que proyecta su luz sobre la fotocélula. Si el operador deseara usar la calculadora para sus fines de cómputo, no tiene más que retirar el imán de este último interruptor de lengüeta.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA VERIFICACION DE LOS ACUERDOS SALT II

RECONNAISSANCE AND ARMS CONTROL. Ted Greenwood en *Scientific American,* vol. 228, n.º 2, págs. 14-25; febrero, 1973.

THE VERIFICATION OF ARMS CONTROL AGREEMENTS. George W. Rathjens en *Arms Control Today,* vol. 7, n.º 7/8, págs. 1-4; julio-agosto, 1977.

SALT II AND AMERICAN SECURITY. Jan M. Lodal en *Foreign Affairs,* vol. 57, n.º 2, págs. 245-268; invierno, 1978-79.

COMO RESPIRAN LOS HUEVOS DE LAS AVES

DIFFUSION OF GASES ACROSS THE SHELL OF THE HEN'S EGG. O. Douglas Wangensteen, Donald Wilson y Hermann Rahn en *Respiration Physiology,* vol. 11, págs. 16-30; 1970-71.

RESPIRATORY GAS EXCHANGE BY THE AVIAN EMBRYO. O. Douglas Wangensteen y Hermann Rahn en *Respiration Physiology,* vol. 11, págs. 31-45; 1970-71.

RESPIRATORY PROPERTIES OF CHICKEN EMBRYONIC BLOOD DURING DEVELOPMENT. Hiroshi Tazawa, Tomohisa Mikami y Chiyoshi Yoshimoto en *Respiration Physiology,* vol. 13, págs. 160-170; 1971.

THE AVIAN EGG: AIR-CELL GAS TENSION, METABOLISM AND INCUBATION TIME. H. Rahn, C. V. Paganelli y A. Ar en *Respiration Physiology,* vol. 22, págs. 297-309; 1974.

THE AVIAN EGG: INCUBATION TIME AND WATER LOSS. H. Rahn y A. Ar en *The Condor,* vol. 76, n.º 2, págs. 147-152; 1974.

ESTRUCTURAS ATOMICAS DE SUPERFICIES CRISTALINAS

LOW ENERGY ELECTRON DIFFRACTION, J. B. Pendry. Academic Press, Londres y Nueva York, 1974.

ELECTRON DIFFRACTION: FIFTY YEARS AGO. Richard Gehrenbeck, en *Physics Today,* n.º 1, pág. 34; enero, 1978.

LOW ENERGY ELECTRON DIFFRACTION. M. A. Van Hove y S. Y. Tong, Springer, 1979.

ARQUEOLOGIA EN EL FONDO DE LOS LAGOS

LES FOUILLES PRÉHISTORIQUES: TECHNIQUES ET MÉTHODES. André Leroi-Gourhan. A. y J. Picard et cie., 1950.

L'ETAT DE LA DENDROCHRONOLOGIE EN EUROPE OCCIDENTALE ET LES RAPPORTS ENTRE DENDROCHRONOLOGIE ET ARCHÉOLOGIE EN SUISSE. Georges Lambert y Christian Orcel en *Archives suisses d'anthropologie générale,* tomo 41, fasc. 2, págs 73-97; 1977.

SILVICULTURA

THE PRACTICE OF SILVICULTURE. David M. Smith. John Wiley & Sons, Inc., 1962.

FOREST ECOLOGY. Stephen H. Spurr y Burton V. Barnes, John Wiley & Sons, Inc., 1973.

TIMBER: BIOLOGICAL AND ECONOMIC POTENTIAL. Stephen H. Spurr y Henry J. Vaux en *Science,* vol. 191, n.º 4227, págs. 752-756; 20 de febrero de 1976.

SOLITONES

PSEUDOPARTICLE SOLUTIONS OF THE YANG-MILLS EQUATIONS. A. A. Belavin. A. M. Polyakov, A. S. Schwartz y Yu. S. Tyupkin en *Physics Letters,* vol. 59B, n.º 1, págs. 85-87; 13 de octubre de 1975.

FERMION-BOSON PUZZLE IN A GAUGE THEORY. P. Hasenfratz y G. 't Hooft en *Physical Review Letters,* vol. 36, n.º 19, págs. 1119-1122; 10 de mayo de 1976.

SPIN FROM ISOSPIN IN A GAUGE THEORY, R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review Letters,* vol. 36, n.º 19, págs. 1116-1119; 10 de mayo de 1976.

SOLITONS WITH FERMION NUMBER 1/2. R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review D,* vol. 13, n.º 12, págs. 3398-3409; 15 de junio de 1976.

SYMMETRY BREAKING THROUGH BELL-JACKIW ANOMALIES. G. 't Hooft en *Physical Review Letters,* vol. 37, n.º 1, págs. 8-11; 5 de julio de 1976.

VACUUM PERIODICITY IN A YANG-MILLS QUANTUM THEORY. R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review Letters,* vol. 37, n.º 3, págs. 172-175; 19 de julio de 1976.

QUANTUM MEANING OF CLASSICAL FIELD THEORY. R. Jackiw en *Reviews of Modern Physics,* vol. 49, n.º 3, págs. 681-706; julio, 1977.

ORIGEN DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

THEORIES OF THE GEOMAGNETIC AND SOLAR DYNAMOS. David Gubbins en *Reviews of Geophysics and Space Physics,* vol. 12, n.º 2, págs. 137-154; mayo, 1974.

THE EARTH'S CORE. J. A. Jacobs. Academic Press, 1975.

LABORATORY SIMULATION OF THERMAL CONVECTION IN ROTATING PLANETS AND STARS. F. H. Busse y C. R. Carrigan en *Science,* vol. 191, n.º 4222, págs. 81-83; 9 de enero de 1976.

MAGNETOHYDRODYNAMICS OF THE EARTH'S DYNAMO. F. H. Busse en *Annual Review of Fluid Mechanics,* vol. 10, págs. 435-462; 1978.

LA INFLUENCIA DEL ESTETOSCOPIO EN EL DESARROLLO DE LA MEDICINA

IN DEFENSE OF THE STETHOSCOPE. James B. Herrick en *Annals of Internal Medicine,* vol. 4, n.º 2, págs. 113-116; agosto, 1930.

DISCUSSION ON THE STETHOSCOPE VERSUS X-RAYS. James Maxwell, Peter Kerley y L. G. Blair en *Proceedings of the Royal Society of Medicine,* vol. 39, págs. 355-357; 1946.

JUEGOS MATEMATICOS

THE SIEVE OF ERATOSTHENES AND THE MÖBIUS STRIP. H. T. McAdams en *The American Mathematical Monthly,* vol. 55, n.º 5, págs. 308-309; mayo, 1948.

TILING WITH INCOMPARABLE RECTANGLES. Edward M. Reingold, Andrew C.C. Yao y Bill Sands en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 8, n.º 2. págs. 112-119; 1975-76.

TALLER Y LABORATORIO

STRESSES IN FREELY FALLING CHIMNEYS AND COLUMNS. Francis P. Bundy en *Journal of Applied Physics,* vol. 11, n.º 2, págs. 112-123; febrero, 1940.

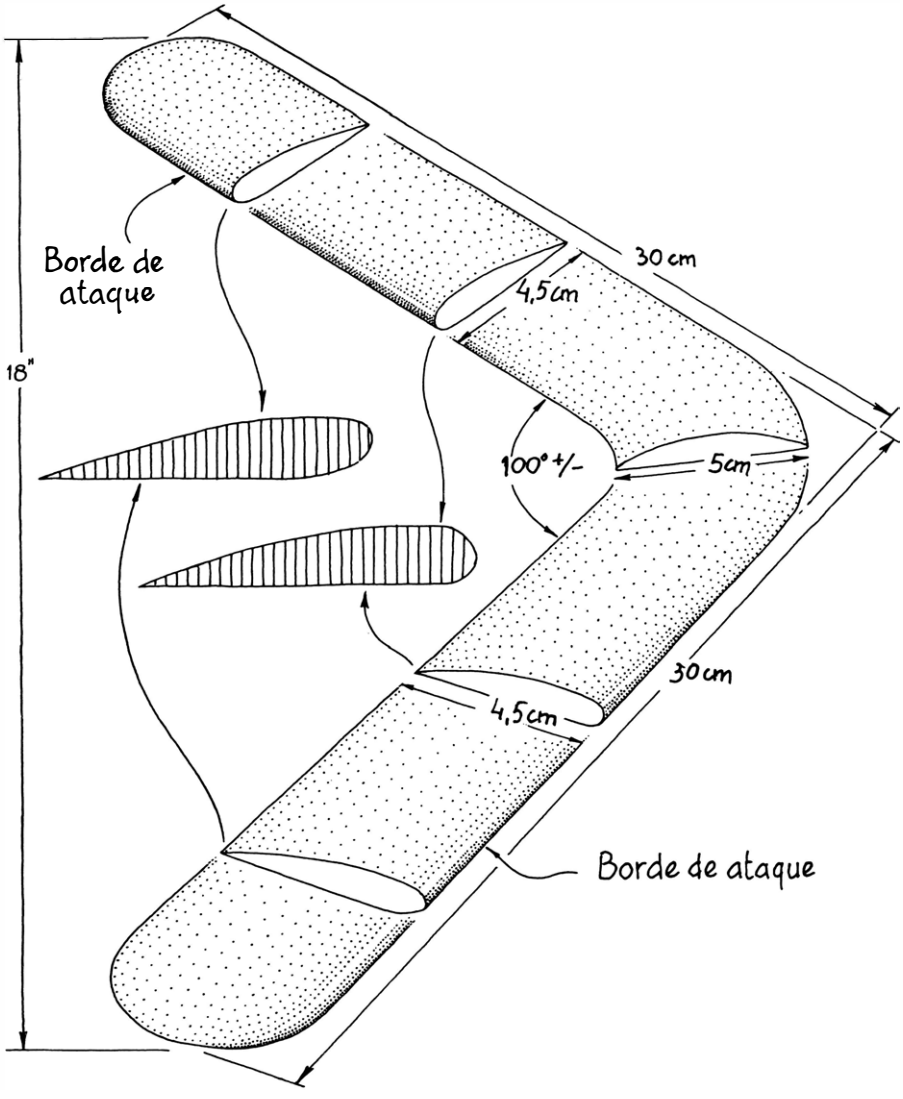
THEORY OF THE CHIMNEY BREAKING WHILE FALLING. Ernest L. Madsen en *American Journal of Physics,* vol. 45, n.º 2, págs. 182-184; febrero 1977.

Taller y laboratorio

El encanto de los bumerangs. Cómo construirlos y mantenerlos en vuelo

Jearl Walker

El bumerang es, sin duda, uno de los instrumentos más antiguos de los usados por el hombre, bien como arma ofensiva o bien como juguete. Se cree casi con seguridad que fue descubierto por los indígenas australianos, al parecer de forma accidental. De cualquier manera, también se tienen noticias de su uso por otros muchos pueblos primitivos en diversos puntos de la tierra. Si lanzamos un palo cualquiera al aire, caerá al suelo, y no demasiado lejos de nosotros; en cambio, un bumerang puede recorrer más de 200 metros (en su recorrido de ida y vuelta) e incluso, si lo lanza un experto, puede ir dirigido con tan extremada precisión como para lograr dar a un enemigo o bien hacer blanco, si es que de un juego se trata. El bumerang se inventó probablemente como arma de ataque diseñada para asegurar una trayectoria rectilínea, pero a la mayoría de la gente le pareció más interesante la versión deportiva australiana del bumerang capaz de retornar a su punto de lanzamiento. Por paradójico que resulte, el bumerang de vuelo rectilíneo es aerodinámicamente más complicado que el de vuelo con retorno. Aunque tanto un modelo como otro son muy antiguos, el investigador aficionado encontrará aquí un tema de profundización al objeto de esclarecer las distintas características de vuelo del ingenio.



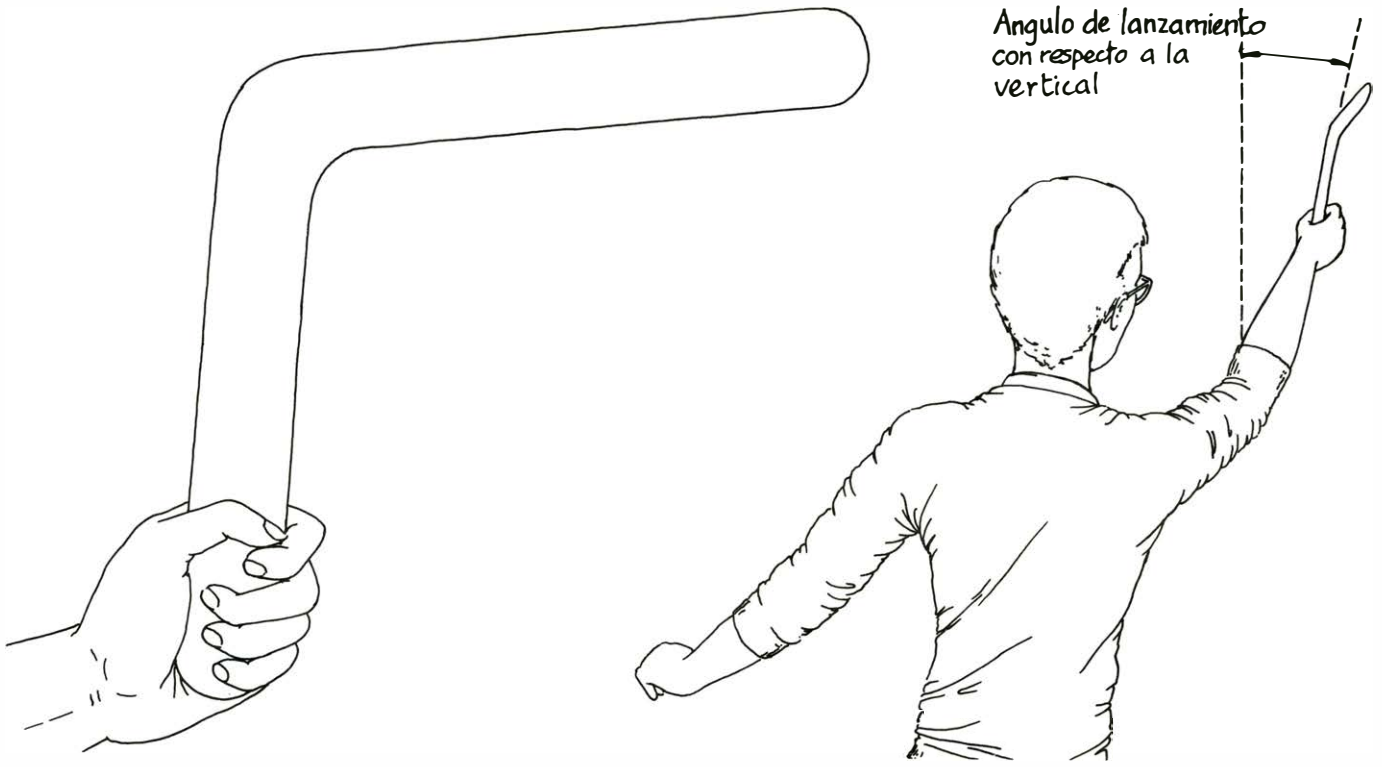
Diseño "Gem" para un bumerang por Herb Smith

Ocasionalmente pueden hallarse buenos ejemplares en tiendas de deportes, pero la mayoría de los bumerangs comerciales están fabricados en serie y no vuelan demasiado bien. Es más, muchos de ellos ni siquiera retornan. Si el lector quiere divertirse con uno, mejor será que empiece por construírselo. Sólo así podrá hacer las variaciones necesarias para determinar qué factores influyen en el vuelo de un bumerang. Un material óptimo para el tronco básico es abedul del Báltico; se aconseja recortar la forma del bumerang de una plancha contrachapada de 6 a 10 milímetros de espesor con cinco o más capas, del tipo de las empleadas en la construcción de embarcaciones. Este tipo de planchas contrachapadas resisten el desgaste por uso y el ataque del agua; son densas, cosa que hace que el bumerang pese más de lo que corresponde a su tamaño.

Recorte en un cartón o cartulina un modelo de bumerang de la forma que prefiera. Puede servir de orientación el que se representa en la figura de la izquierda y que corresponde a un bumerang con retorno diseñado por Herb Smith (si la persona que lo va a lanzar es zurda, deberá fabricarse un bumerang para zurdos, que es la imagen especular de uno para diestros). Coloque el modelo anterior sobre la plancha contrachapada y marque los bordes del mismo sobre la plancha con un lápiz.

Recórtese la forma del bumerang con una sierra de albardilla o con un serrucho. Dése luego, a los bordes y a la parte superior, la forma general mostrada en la ilustración. (Con la parte de abajo no se hace más que redondear lo que será el borde de ataque.) El borde de ataque debe ser romo y afilado el borde de salida, de suerte que la superficie superior posea una inclinación descendente para unirse con la superficie del plano inferior que no ha sido modificada.

Se sujeta la pieza recortada a un banco de carpintero con unas tuercas; con una escofina de superficie curva, hay que recortar y afilar los bordes y la parte superior. Se eliminan los estrías dejadas por la escofina y se termina de dar forma a la madera frotando sus superficies con papel de lija grueso colocado alrededor de un trozo de madera blanda. Antes de dar el acabado final a la superficie con otro papel de lija más fino, hay que probar el vuelo del bume-

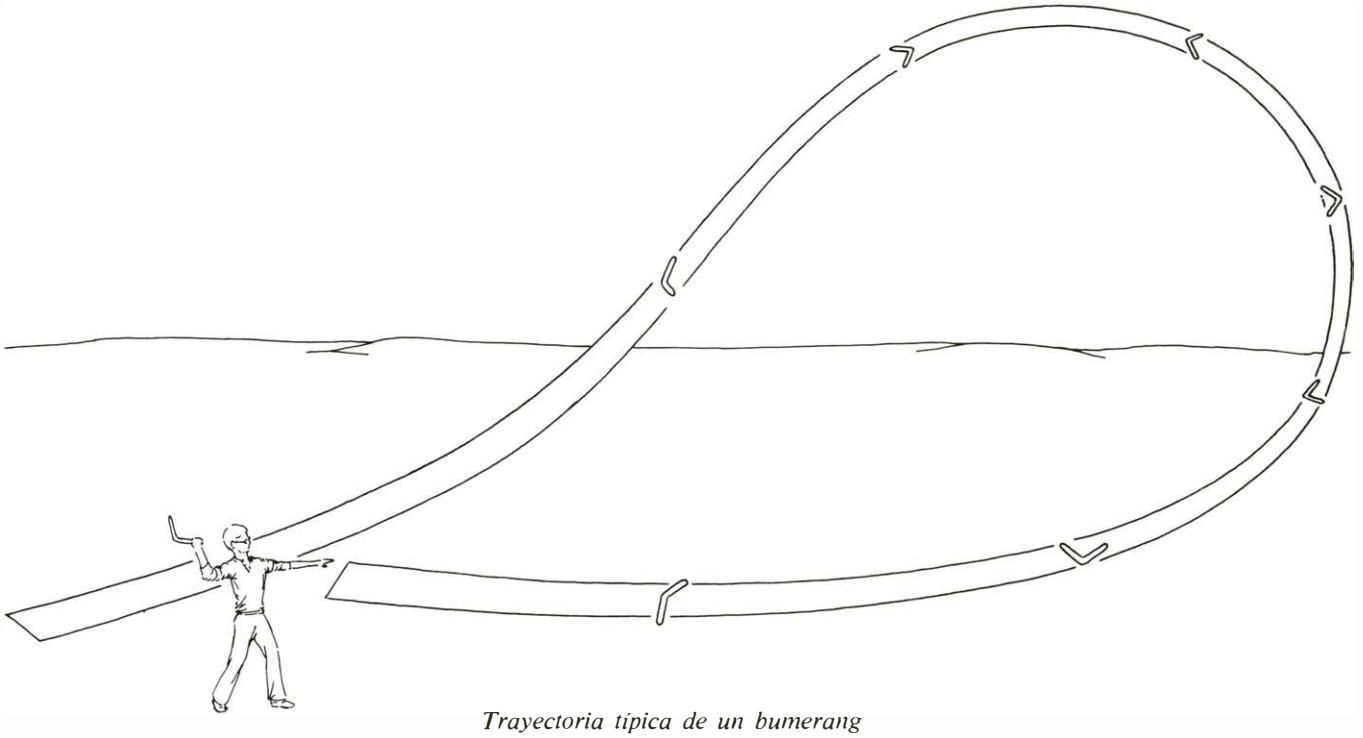


Disponiéndose para el lanzamiento de un bumerang

rang, a fin de que el ingenio pueda ajustarse bien con la escofina o bien con un papel de lija más grueso. Afinar un bumerang vale decir que primero se arroja, luego se recorta o se pule otro poco lanzándolo de nuevo y así hasta que el bumerang vuele en la forma pretendida.

Cuando hay mucho viento, el bumerang no puede volar bien. Si el viento es suave, debemos colocarnos frente a él, girar 45 grados a la derecha y lanzar el bumerang en esa dirección. Hay que mantener el aparato en posición vertical, sosteniéndolo por el extremo de uno de sus brazos (no tiene mucha importancia por cuál de ellos se sujete) con la cara plana hacia fuera. Lleve el bumerang por detrás de su cabeza, y láncelo entonces hacia el horizonte, procurando soltarlo cuando el brazo esté totalmente estirado hacia delante. No hay que pretender lanzarlo muy fuerte al principio; lo que cuenta es la manera de soltarlo, no la fuerza del lanzamiento. El bumerang permanece en el aire sin caerse debido al giro que se le ha proporcionado al impulsarlo.

La correcta orientación del juguete (es decir, el plano en que gira sobre sí



Trayectoria típica de un bumerang

mismo) variará de acuerdo con las condiciones del viento y con el tipo de bumerang. Para conseguir un buen vuelo hay que lanzarlo con su plano de giro casi vertical. Bajo otras condiciones será necesario desviar el plano de giro (ladeando la parte superior del mismo hacia fuera) ángulos que pueden alcanzar los 45 grados. Mientras más desviemos de la vertical el plano en el que gira, mayor será la elevación inicial que realice el bumerang. Si el desvío inicial de lanzamiento es demasiado grande, puede elevarse demasiado rápido y desplomarse hasta el suelo con tal fuerza que puede incluso romperse.

En un vuelo correcto, el bumerang con retorno recorre en el plano horizontal una trayectoria circular alrededor de una esfera imaginaria. Cuando esté casi terminando el retorno, probablemente se remontará un poco y hasta llegará a trenzar un pequeño rizo antes de caer al suelo, a sus pies.

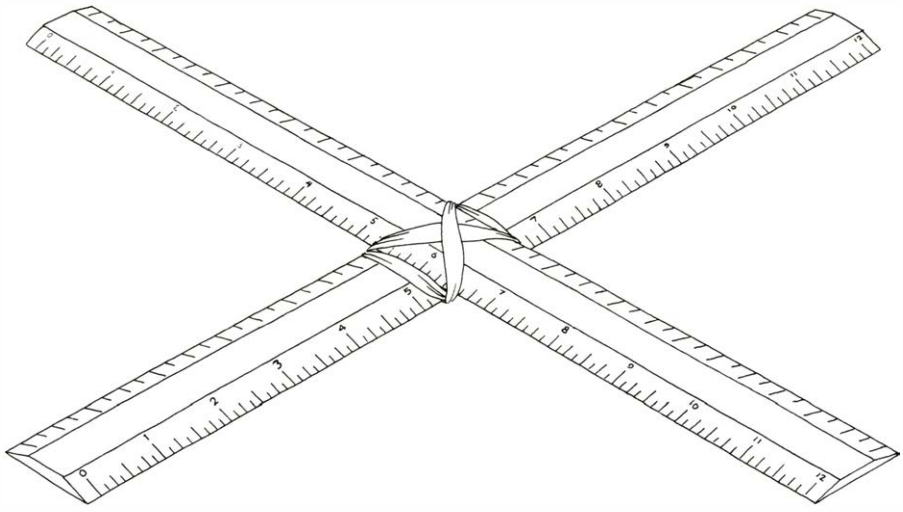
No obstante, si el lanzador tiene suerte, el bumerang puede hacer uno o dos círculos adicionales (menores que el primero) antes de caer. Aunque se lance el bumerang con su plano de giro casi vertical, probablemente retornará con el plano casi horizontal. Más adelante explicaremos por qué debe variar así el plano para que el bumerang complete su recorrido.

Si a pesar de reinar un viento suave o ligero su bumerang cae sistemáticamente a su derecha, trate de lanzarlo un poco más a la izquierda de la dirección del viento. De igual manera, si el bumerang retorna demasiado a su izquierda, trate de lanzarlo más a la derecha de la dirección del viento. Si aterriza por detrás del lanzador, procurar impulsarlo con menos fuerza. Si esto no resulta, habrá que lanzarlo un poco por encima de la línea del horizonte con un plano de giro desviado un poco menos de la vertical. Si no hay viento y no consigue que el bumerang retorne totalmente, desvíe aún más el plano de giro de la vertical al objeto de ganar altura durante el vuelo.

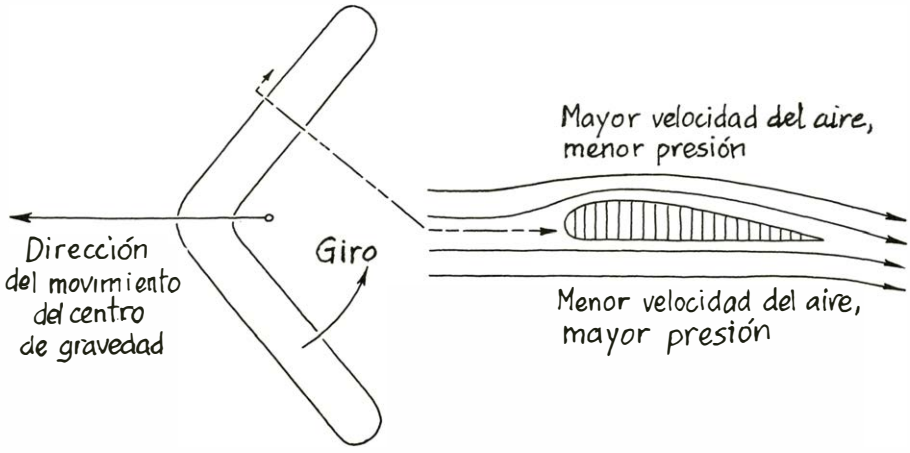
Hay que procurar no dañar a nadie ni estropear nada con el bumerang. No debemos olvidar nunca su carácter peculiar de arma ofensiva. Se lanzará sólo cuando se esté en un gran espacio abierto. Si hay gente en los alrededores debemos asegurarnos de que saben que estamos ensayando un bumerang, con el fin de que estén atentas a esquivarlo en caso de que vaya en su dirección.

El buen ajuste de un bumerang depende, a la vez, de la experiencia y de la suerte. En general, si se le da una mayor curvatura a la superficie superior, volará más alto, pero el círculo que describirá a lo largo de su viaje será más cerrado. Aplanando más la superficie superior o curvando más la de abajo, conseguiremos que el bumerang vuele a menor altura, ya que la forma de la sección perpendicular de los brazos se asemejará menos a la clásica superficie de sustentación aerodinámica. Si la velocidad de rotación disminuye demasiado deprisa, de forma que el bumerang caiga al suelo a mitad de su vuelo, la explicación puede consistir en la excesiva fricción del aire sobre sus brazos, lo que le va restando velocidad de rotación. Aunque la superficie algo rugosa puede resultar beneficiosa para el vuelo, todas las rayaduras importantes originarán, casi con seguridad, corrientes adicionales de aire que acortarán el tiempo de vuelo.

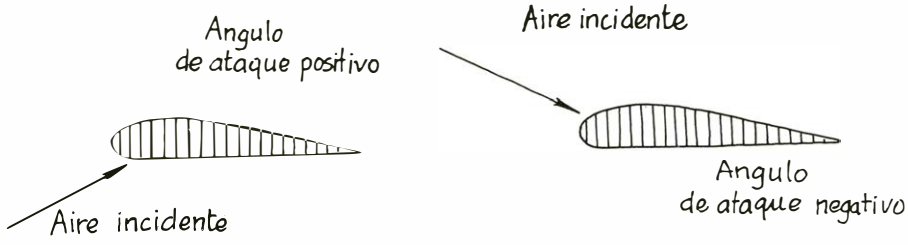
No hay que empecinarse porque el bumerang tenga la forma típica ideal; quizá se prefiera doblarlo de manera que durante el vuelo el borde de ataque de cada brazo esté desviado a fin de deflectar el aire hacia la derecha, dando al bumerang una elevación hacia la izquierda. La existencia de este tipo de levantamiento es fácil de demostrar. Si se saca una mano por la ventanilla de un coche en marcha y se guía ésta de manera que tome diferentes ángulos con respecto a la corriente de aire, se notará



Un diseño para un bumerang de cuatro brazos hecho con dos reglas y una banda de goma



Sistema de corrientes de aire que rodean un brazo del bumerang en vuelo



Angulos de ataque positivos y negativos

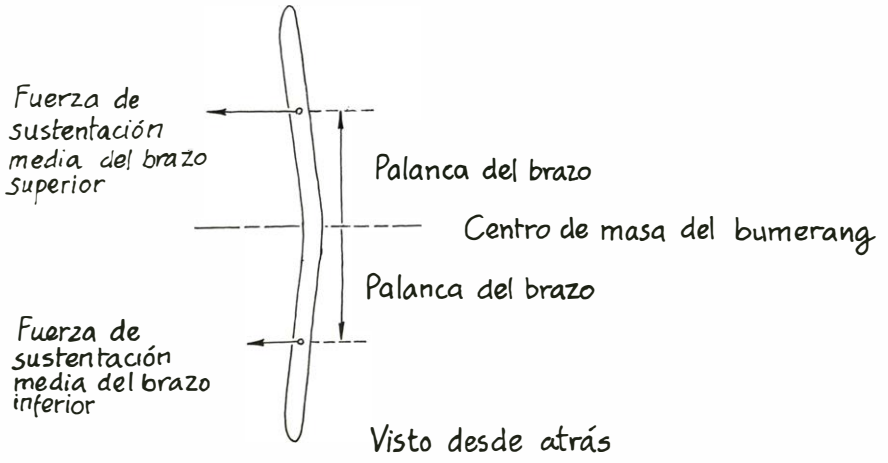
cómo la mano sufre un empuje ascendente. Para doblar un bumerang lo mejor es calentarlo de forma gradual por encima de los 200 grados centígrados y conferirle luego la forma deseada (por supuesto, con guantes) antes de que la madera se enfríe. Si lo hemos doblado demasiado, bastará calentarlo de nuevo para corregir el ángulo.

Una vez hemos construido un bumerang que vuele correctamente, podemos darle el acabado final forrándolo con papel convenientemente decorado. El excelente folleto de Smith que citamos en las referencias bibliográficas de la revista, explica cómo hacer este tipo de acabado y también da un gran número de diseños de bumerang.

Si se rompe el bumerang no tire los trozos, péguelos con epoxy, manteniéndolos juntos hasta que se sequen, puliendo a continuación la superficie hasta que vuelva a tener la forma deseada. Aunque el bumerang no será ya tan resistente como antes, posiblemente su nueva trayectoria de vuelo se habrá modificado, quizá de forma interesante, debido al cambio habido en la distribución de su masa como consecuencia de la ruptura y del arreglo.

El bumerang no tiene por qué limitarse sólo a dos brazos. Es más, uno de los bumerangs más sencillos de construir es el de cuatro hojas, ya que se puede hacer simplemente cruzando dos reglas iguales y uniéndolas por el centro. Este tipo de regla debe tener un poco curvada la superficie superior y bastante plana la superficie inferior. Podemos unirlos por el centro con un trozo de goma elástica resistente o con una tuerca y un tornillo aprovechando el agujero central que normalmente suelen traer. Este tipo de bumerang se lanza como los de dos brazos, pero hay que prestar atención a no cortarse con los bordes afilados y, sobre todo, no emplear reglas de bordes metálicos.

Se puede fabricar un bumerang sencillo en forma de cruz a partir de un cuadrado de cartón de unos 12-centímetros de lado. Para ello habrá que recortar un bumerang con tres o cuatro hojas, doblándolas un poco de manera que no todo el bumerang esté en el mismo plano. Se aumenta el alcance del bumerang añadiendo peso a sus brazos. A este modelo de cartón es muy sencillo aumentarle de peso colocándole clips en los extremos de sus brazos. Con él se pueden hacer demostraciones incluso en clase. Si su alcance es demasiado grande para las dimensiones del aula, se puede disminuir dicho alcance incrementando el doblez de los brazos de manera que el bumerang sea, en conjunto, menos plano, o bien doblando los brazos a lo largo de su línea central y en toda su longitud. Con esta última técnica, los brazos tienen una exagerada forma de superficie de sustentación: por una de las caras es tremendamente convexo, mientras que por la otra no. Como es normal, se debe lanzar el bumerang con la parte convexa hacia el que lo lanza. Modificando la forma de los brazos, desde una forma plana hasta lo más parecido a una superficie de sustentación, se puede elevar la altura de vuelo del bumerang, si bien a costa de que en su recorrido forme un círculo más cerrado.



Elevación media del brazo superior y del inferior

Cuando ya sepa lanzar bien el bumerang de madera, al lector se le puede ocurrir intentar atraparlo. El resultado puede ser un brusco golpe en los dedos. Pero si persiste en conseguirlo, conviene que mantenga las manos abiertas, enfrentadas entre sí y, cuando el bumerang esté revoloteando, girando sobre sí mismo en la última etapa de su vuelo, junte las manos rápidamente y procure agarrarlo en medio. Hay que tener cuidado en mantener los dedos fuera del giro de las aspas.

La explicación de por qué retorna un bumerang se basa principalmente en la sección perpendicular de sus brazos y en el giro que sobre sí mismo realiza el ingenio. Sin estas dos características, el bumerang se comportaría como cualquier otro palo. La forma de la sección perpendicular da al bumerang una ascensión aerodinámica del mismo tipo que la que producen determinadas formas de alas de avión. El giro sobre sí mismo le confiere estabilidad. Las leyes que rigen la mecánica de la rotación dan cuenta de cómo el movimiento giratorio hace que el eje sobre el cual se mueve el bumerang rote de una manera muy parecida a como el eje de giro de una peonza gira alrededor de la vertical. La fuerza ascensional y la estabilidad mantienen al bumerang arriba y la rotación del eje de giro le impulsa a retornar al punto de partida.

La fuerza ascensional aerodinámica puede explicarse con el sencillo ejemplo de la clásica ala de aeroplano, similar a la que describí en esta sección en abril de 1978 para explicar la ascensión de una cometa. La superficie de sustentación tiene el fondo plano, el frente romo, la parte de atrás afilada y la de arriba convexa. El aire pasa alrededor del ala más rápido por su parte superior que por su parte inferior. La razón se puede ver porque la corriente de aire tiene dos tipos de componentes. Un tipo de corriente fluye alrededor del ala sin rotaciones y con la misma velocidad tanto por arriba como por debajo del ala. La otra es una célula de circulación que fluye hacia atrás por la parte superior del ala y hacia delante por la parte inferior. Dicha circulación se forma en un ala real debido a la viscosidad del aire y su adhesión a la superficie del ala, que la obliga a seguir su forma incluso cuando ya se ha terminado por la parte de atrás la superficie curvada de la parte superior.

Cuando se superponen las dos corrientes ideales mencionadas, en la parte superior se suman y en la inferior se restan; resulta así que la velocidad del aire es mayor en la parte superior del ala que bajo ella. Esta diferencia es importante con respecto a la fuerza ascensional, ya que la presión del aire en una corriente es inversamente proporcional a su velocidad. Por tanto, la presión del aire es menor sobre el ala que bajo la misma: es decir, el ala sufre un empuje hacia arriba. (Un ala de un aeroplano real puede presentar una configuración de corrientes aerodinámicas más complicada que la de este sencillo modelo. Además, cuando un aeroplano viaja a gran velocidad, parte de la fuerza ascen-

sional puede venir del impacto del aire al pasar por debajo de un ala si ésta se encuentra ligeramente inclinada hacia arriba con el fin de deflectar el aire hacia abajo.)

Si una clásica superficie de sustentación está inclinada respecto a una corriente de aire, de manera que dicha corriente incida mucho sobre la superficie curvada de la parte superior, la fuerza ascensional es menor. Tal disposición se dice que tiene un ángulo de ataque negativo. En un modelo sencillo, la reducción de la fuerza ascensional obedece al empuje hacia abajo que produce la corriente al incidir sobre la parte superior. También se podría argüir que la ascensión se pierde parcialmente debido a que la tendencia del aire a rodear el ala es menor y, por tanto, la diferencia de velocidades del aire encima y debajo del ala también es menor.

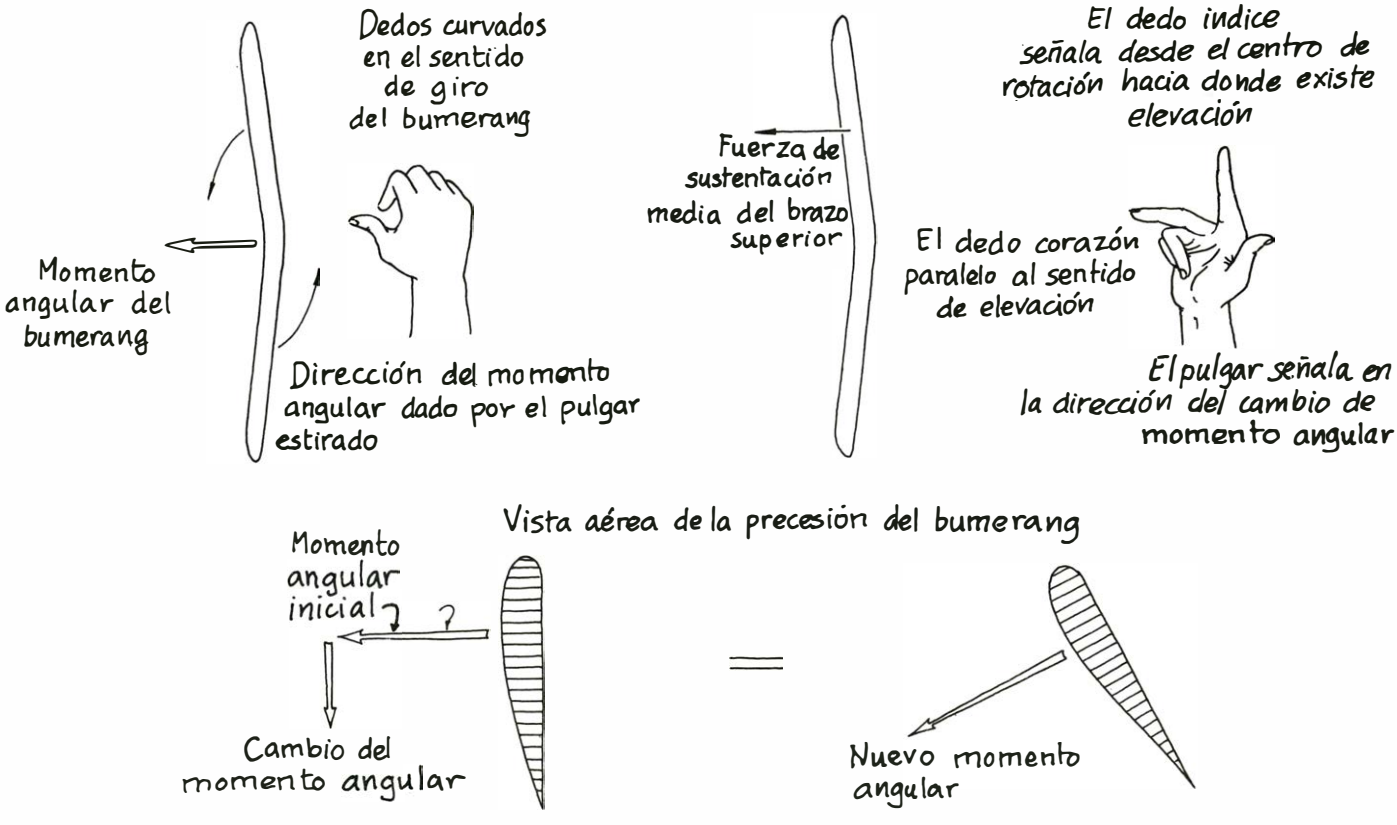
Por el contrario, si el ala se inclina de forma que la corriente de aire incida más en el lado plano bajo que en el alto, situación que sería llamada ángulo de ataque positivo, la elevación se incrementa en virtud del empuje ascensional procedente de la corriente de aire en la parte de abajo. También se incrementa la resistencia ofrecida por el aire. Si el ángulo es demasiado grande, la desventaja debida al incremento de la resistencia del aire es superior a la ventaja producida por la elevación. El ángulo de ataque de los brazos del bumerang cuando están girando en el aire es importante para su vuelo.

Los brazos de un bumerang pueden tener gran variedad de perfiles, pero la mayoría tienen una sección transversal similar a la de las alas clásicas. Normalmente, esta forma supone la existencia de un borde romo que gira en el aire a medida que el bumerang da vueltas y otro borde más afilado que es arrastrado durante el giro. Un lado suele ser plano y el otro convexo. Existen, sin embargo, numerosas variedades de esta estructura fundamental; parece que, hasta ahora, se han hecho pocos trabajos sistemáticos encaminados a determinar qué formas son las mejores desde el punto de vista aerodinámico. Algunos bumerangs son incluso planos por ambos lados, pero tienen los brazos torcidos al objeto de que el aire pueda deflectar a medida que éstos giran en el aire.

La fuerza de sustentación de un bumerang difiere bastante de la fuerza de sustentación de un ala clásica. Al comienzo de un vuelo la fuerza de sustentación del bumerang es, sobre todo, horizontal, con sólo la fuerza ascendente suficiente para mantener en equilibrio el peso del aparato. Puesto que el bumerang gira principalmente sobre un eje horizontal, los lados curvados de los brazos dan vueltas en un plano que es casi vertical, y la fuerza de sustentación casi horizontal. Por mor de simplicidad, en lo que sigue no tendremos en cuenta –por ahora– el peso del bumerang. Supondremos también que el bumerang es lanzado con la mano derecha, de manera que el plano de giro sea al principio exactamente vertical. La elevación se realizará hacia la izquierda del lanzador; así el bumerang empezará a moverse hacia la izquierda a medida que continúa girando en el plano vertical.

Si éste fuera todo el proceso, el bumerang no volvería nunca. Para ver por qué gira y regresa hay que entender primero qué otra influencia tiene la fuerza de sustentación sobre el bumerang. En particular importa saber cómo el par debido a la ascensión en el bumerang origina un movimiento de precesión del plano de giro.

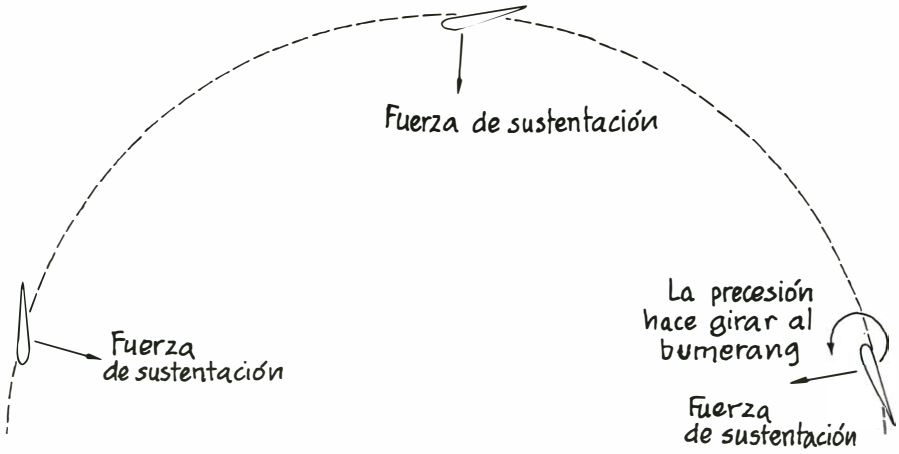
Imaginemos que uno de los brazos del bumerang ha ascendido en su giro hasta la posición más elevada posible y el otro brazo está casi en su posición más baja (estoy hablando del bumerang típico en forma de plátano). El brazo superior gira en la misma dirección que se mueve el centro del bumerang, mientras que el brazo inferior se mueve en dirección opuesta a la del centro. El aire próximo al brazo superior se mueve más de prisa (con relación al brazo) que el aire próximo al brazo de abajo. Por ello, se origina una fuerza de sustentación mayor en el de arriba que en el de abajo. La



Cómo determinar el momento angular y el cambio de éste

parte superior del bumerang experimentará siempre una mayor fuerza de sustentación y, por ello, un mayor impulso lateral que la parte inferior.

Mi primer pensamiento fue que la diferencia en la fuerza de sustentación (mayor fuerza en el brazo superior que en el inferior) harían que el plano de giro del bumerang se inclinara, dirigiendo así la fuerza resultante hacia abajo, lo cual tendría un efecto desastroso. Sin embargo, lo que realmente sucede es que la diferencia entre las fuerzas de sustentación produce una rotación del plano sobre un eje vertical. Esta rotación del plano de giro, conocida comúnmente como precesión, es la que hace que el bumerang retroceda.



Cómo mantiene la precesión el ángulo de ataque positivo

Para descubrir la causa de la rotación debemos examinar el par creado por la fuerza de sustentación. Tomemos el centro del bumerang como el eje sobre el cual éste gira (en realidad, el centro de masa alrededor del cual gira un bumerang con dos brazos es probable que esté bastante lejos de su punto medio, pero esto no invalida el argumento). Supongamos que el promedio de la fuerza de sustentación del brazo superior está dirigido horizontalmente hacia fuera desde el centro del brazo. De la misma forma, supongamos que el promedio de la fuerza de sustentación del brazo inferior está también dirigido horizontalmente hacia fuera desde el centro del brazo. El par creado por una de estas fuerzas, medido desde el centro del bumerang, es el producto de la fuerza de sustentación por la distancia hasta el punto en el que está aplicada, es decir, la mitad de la longitud del brazo. Dado que el brazo superior sufre un empuje ascendente mayor, también tiene un par mayor.

Si el bumerang no estuviera girando, la diferencia entre ambos pares provocaría sólo una inclinación de su plano. Por tener el brazo de arriba un par mayor, el plano se inclinaría en sentido contrario al que giran las agujas de un reloj visto por la persona que acabara de lanzar el bumerang. Sin embargo, el hecho de que éste gire supone una gran diferencia, porque el bumerang tiene entonces un momento angular y la tendencia a que el plano de rotación se incline se convierte en una rotación del mismo sobre el eje vertical.

El momento angular es el producto de la velocidad de rotación del bumerang por una función que relaciona la masa y la distribución de ésta en el sólido. Recurramos a un ejemplo de otro contexto: imaginemos que vamos a poner en marcha un tiovivo donde han subido varios niños. La fuerza tangente al borde que se aplica multiplicada por el radio del tiovivo es el par que le proporcionamos. Al empezar, el par origina una aceleración angular del tiovivo; la velocidad de rotación aumenta desde cero hasta algún valor final. ¿Cómo se deberían colocar los niños para conseguir una cierta aceleración angular con la menor fuerza posible? Instintivamente, los colocaríamos cerca del centro. Su masa es –por supuesto– la misma, pero su distribución con respecto al centro de rotación difiere. Cuando la masa se halla más cerca del centro, el tiovivo gira con más facilidad. La masa y su distribución son tenidas en cuenta por la función conocida como momento de inercia. Cuanto mayor sea la masa, o cuanto más lejos del centro se halle colocada, mayores serán el momento de inercia y la fuerza que habrá que aplicar para conseguir una aceleración angular dada.

Una vez que el tiovivo está girando y que ya no estamos empujando en el borde, el aparato tienen un cierto momento angular debido a su velocidad de rotación y a su momento de inercia. El momento angular se representa normalmente por un vector perpendicular al plano en el cual se mueve el objeto. Aquí el vector sería vertical. El sentido (hacia arriba o hacia abajo) se elige por convención como la dirección del pulgar de la mano derecha cuando la ponemos en pose de auto-stop con los dedos doblados en la dirección del giro del objeto.

El tamaño o el sentido de tal vector sólo se podrían modificar aplicando otro par al objeto. Con un tiovivo se podría volver a empujar en el borde otra vez. (A la hora de elegir cómo trazar un vector que represente el cambio del momento angular podría convenirse en dirigir el dedo índice de la mano derecha desde el centro de rotación hacia el lugar donde se aplica la fuerza y señalando con el dedo corazón en la dirección de la fuerza aplicada. Si se coloca el dedo pulgar de esa mano perpendicular a ambos dedos, éste señalará automáticamente en el sentido del cambio en el momento angular. El nuevo vector del momento angular es la combinación del anterior y del que representa el cambio.) Con un tiovivo al que se ha vuelto a empujar de forma tangente al borde, el nuevo vector seguiría siendo vertical, pero sería mayor o menor dependiendo de si la intención era hacer que éste girara más deprisa o más despacio.

Un bumerang que gire tiene dos pares actuando en los brazos: uno creado por el promedio de la fuerza de sustentación en el brazo superior y otro por el promedio de la fuerza en el brazo inferior. Dado que en el brazo superior es mayor, éste determina el momento angular y, por ello, ignoraré la fuerza sobre el brazo inferior (el razonamiento no cambiaría aunque incluyera la fuerza de sustentación del brazo inferior). Imaginemos al bumerang que se aleja del lanzador tras el impulso de éste con su brazo derecho. Gira en un plano vertical y tiene un vector momento angular dirigido hacia la izquierda del lanzador. La fuerza resultante en el brazo superior crea un par que cambiará la dirección del vector a medida que el bumerang continúa volando.

Para determinar cómo cambia el vector, podemos usar nuestra mano derecha, orientando el pulgar y el resto de los dedos adecuadamente. Con el dedo índice indicando desde el centro del bumerang al centro del brazo superior y el dedo corazón señalando hacia la izquierda, con el fin de estar en la dirección de la fuerza de sustentación en ese brazo, el pulgar estirado deberá apuntar hacia uno mismo. Así, el vector que representa el cambio del momento angular señalará en la misma dirección. La combinación mental del nuevo vector y del anterior se hace mejor mirándolo desde arriba. El vector que representa el

cambio es perpendicular al original y proporciona un nuevo vector desviado del anterior hacia el observador. El valor del momento angular no se altera porque el nuevo vector es perpendicular al anterior; sólo ha cambiado la dirección del momento angular, que ha girado sobre un eje vertical para apuntar más hacia el observador.

Este tipo de rotación de un vector de momento angular se denomina precesión; se puede observar cuando el eje de una peonza "precesa" en torno a la vertical. Otro ejemplo común de precesión se puede ver en el giro de una motocicleta. Las ruedas de una motocicleta giran lo suficientemente deprisa y tienen momentos de inercia lo bastante amplios como para hacer que su momento angular sea grande. Para que una motocicleta gire, no basta con torcer el manillar (como se haría con una bicicleta), sino que hay que inclinarla hacia el lado deseado. Los pares a que está sometida la motocicleta hacen "precesar" los vectores de momento angular de las ruedas y la motocicleta gira como un todo.

Durante la precesión del plano de rotación de un bumerang, éste continúa avanzando a una cierta velocidad, pero se deflecta continuamente debido a la fuerza horizontal que experimenta. El recorrido resultante es casi un gran círculo. En el vuelo con éxito de un bumerang el plano de giro "precesará" a la misma velocidad que lo hace el aparato en su recorrido. Su ángulo de ataque sigue siendo positivo. Esta proporción es necesaria para mantener los brazos con el ángulo de ataque adecuado.

Supongamos que el bumerang "precesa" demasiado despacio. En cuyo caso, a medida que éste se mueve a lo largo de su recorrido circular, su plano de rotación gira sobre un eje vertical a una velocidad más baja que la velocidad a la que se mueve el bumerang a lo largo de su recorrido. Cuando el plano de rotación se retrasa, el ángulo de ataque se va haciendo progresivamente negativo y el bumerang pierde altura.

Si el plano de giro "precesa" con demasiada velocidad, éste gira sobre un eje vertical más rápidamente que lo hace el bumerang como un todo viajando a lo largo del gran recorrido circular. En consecuencia, el ángulo de ataque se va haciendo progresivamente positivo hasta que el plano de rotación es perpendicular a la corriente de aire que recibe; mas, para entonces, la resistencia del aire ya habrá estropeado el vuelo.

El equilibrio entre la velocidad de precesión y la velocidad a que viaja el bumerang a lo largo de su gran recorrido circular no es crítico; en realidad es automático hasta cierto punto, ya que ambas velocidades dependen de la fuerza de sustentación. Es necesario lanzar repetidas veces el bumerang, cambiando cada vez la forma de las alas ligeramente hasta situarse cerca de este equilibrio y conseguir que regrese. Pero no conozco ninguna forma segura de corregir el vuelo de un bumerang que ya ha fracasado persistentemente.

El recorrido circular del bumerang es independiente de la velocidad con que se lanza. El momento de inercia y la forma de sección transversal del mismo determinan el radio del recorrido. Así pues, con un bumerang dado se podrá conseguir un mismo círculo grande (con el mismo lanzamiento de éste en el plano vertical que hemos supuesto) con independencia de la fuerza con que se lance el aparato (siempre que se lance lo suficientemente fuerte como para que pueda completar su recorrido). Si se desea cambiar la amplitud del círculo, hay que elegir un bumerang distinto con un momento de inercia diferente o de otra sección transversal. El mes próximo explicaré cómo se puede añadir lastre a los brazos con el fin de incrementar su momento de inercia. Esta técnica se usa por los lanzadores de bumerangs en su intento de batir records de distancia.

El "frisbee" vuela de forma bastante parecida. Tiene una superficie superior curvada y se lanza con una sacudida de la muñeca para hacerle girar. El "frisbee" gana altura por medio del impacto del aire o por la diferencia en la velocidad del aire entre su parte alta y la baja. Un "frisbee" debidamente lanzado en un plano casi vertical volverá al lanzador lo mismo que lo hace un bumerang. Sin embargo, lo normal es que un "frisbee" se lance de modo que gire ligeramente hacia otra persona, y así el lanzador orienta el plano de giro para proporcionarle justo el impulso horizontal suficiente para que pueda describir la curva.

Tanto el bumerang como el "frisbee" pueden ser deslizados a ras del suelo sin destruir el vuelo. Imaginemos un "frisbee" que pase rozando el suelo con su borde guía inclinado ligeramente hacia abajo. Este borde golpeará el suelo; la fuerza del suelo en el punto de contacto origina un par en el aparato y cambia el momento angular, pero debido a que el vector cambio es casi perpendicular al vector momento angular original, el nuevo vector momento angular es sólo una rotación del original. El momento angular no cambia significativamente de tamaño, sólo modifica el sentido. El giro del "frisbee" no se reduce mucho, el aparato sólo es reorientado y sigue deslizándose en otra dirección.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

OBJETOS APOLO

METEORITES AND THE ORIGIN OF PLANETS. J. A. Wood. McGraw-Hill Book Company, 1968.

METEORITES: CLASSIFICATION AND PROPERTIES. John T. Watson. Springer-Verlag, 1974.

SPACE GEOLOGY: AN INTRODUCTION. Elbert A. King. John Wiley & Sons, Inc., 1976.

THE ASTEROIDS. Clark R. Chapman, James G. Williams y William K. Hartmann en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 16, págs. 33-75; 1978.

METASTASIS CANCEROSAS

A PATHOBIOLOGIC OVERVIEW OF METASTASIS. L. Weiss en *Seminars in Oncology,* vol. 4, n.º 1. págs. 5-19; marzo, 1977.

EXPERIMENTAL TUMOR METASTASIS: CHARACTERISTICS AND ORGAN SPECIFICITY. Garth L. Nicolson en *Bioscience,* vol. 28, n.º 7, págs. 441-447; julio, 1978.

SPECIFICITY OF ARREST, SURVIVAL, AND GROWTH OF SELECTED METASTATIC VARIANT CELL LINES. Garth L. Nicolson y Kennteh W Brunson en *Cancer Research,* vol. 38, n.º 11, págs. 4105-4111; noviembre, 1978.

EL ESPECTRO DEL HIDROGENO ATOMICO

OPTICAL RESOLUTION OF THE LAMB SHIFT IN ATOMIC HYDROGEN BY LASER SATURATION SPECTROSCOPY. T. W. Hänsch, I. S. Shahin y A. L. Schawlow en *Nature Physical Science,* vol. 235, n.º 56, págs. 63-65; 24 de enero de 1972.

AN EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE RYDBERG CONSTANT. B. P. Kibble, W. R. C. Rowley, R. E. Shawyer y G. W. Series en *Journal of Physics B,* vol. 6, págs. 1079-1089; junio, 1973.

HYDROGEN 1*S*- 2*S* ISOTOPE SHIFT AND 1*S* LAMB SHIFT MEASURED BY LASER SPECTROSCOPY. S. A. Lee, R. Wallenstein y T. W. Hänsch en *Physical Review Letters,* vol. 35, n.º 19, págs. 1262-1266; 10 de noviembre de 1975.

LA PERCEPCION DE LOS BLANCOS Y NEGROS DE LAS SUPERFICIES

DISCOUNTING THE BACKGROUND–THE MISSING LINK IN THE EXPLANATION OF CHROMATIC INDUCTION. J. Walraven en *Vision Research,* vol. 16, págs. 289-295; 1976.

PERCEIVED LIGHTNESS DEPENDS ON PERCEIVED SPATIAL ARRANGEMENT. Alan L. Gilchrist en *Science,* vol. 195, n.º 4274, págs. 185-187; 14 de enero de 1977.

LA TEORIA RETINEX DE LA VISION DEL COLOR. Edwin H. Land en *Investigación y Ciencia,* n.º 17, págs. 64-81; febrero, 1978.

CANALES IONICOS EN LA MEMBRANA DE LA CELULA NERVIOSA

ORGANIZATION OF THE IONIC CHANNELS IN NERVE MEMBRANES. Richard D. Keynes en *The Nervous System, vol. 1: The Basic Neurosciences,* dirigido por Donald B. Tower. Raven Press, Publishers, 1975.

IONIC CHANNELS IN EXCITABLE MEMBRANES: CURRENT PROBLEMS AND BIOPHYSICAL APPROACHES. Bertil Hille en *Biophysical Journal,* vol. 22, págs. 283-294; 1978.

DELFINES

MAMMALS OF THE SEA: BIOLOGY AND MEDICINE. Dirigido por Sam H. Ridgway. Charles C. Thomas, Publisher, 1972.

OCURRENCE AND GROUP ORGANIZATION OF ATLANTIC BOTTLENOSE PORPOISES *(TURSIOPS TRUNCATUS)* IN AN ARGENTINE BAY. Bernd Würsig en *The Biological Bulletin,* vol. 154, n.º 2, págs. 348-359; 1978.

CATAPULTAS ANTIGUAS

THE MECHANICAL TECHNOLOGY OF GREEK AND ROMAN ANTIQUITY. A. G. Drachmann. E. Munksgaard, 1963.

GREEK CATAPULTS AND CATAPULT TECHNOLOGY: SCIENCE TECHNOLOGY AND WAR IN THE ANCIENT WORLD. Barton C. Hacker en *Technology and Culture,* vol. 9, n.º 1. págs. 34-50; enero, 1968.

GREEK AND ROMAN ARTILLERY. E. W. Marsden. Oxford at the Clarendon Press. 1969-71.

GEARS FROM THE GREEKS: THE ANTIKYTHERA MECHANISM– A CALENDAR COMPUTER. Derek de Solla Price en *Transactions of the American Philosophical Society, New Series,* vol. 64, parte 7; 1974.

INMUNOHISTOQUIMICA EN LA MICROSCOPIA ELECTRONICA

ENZYME-LABELED ANTIBODIES: PREPARATION AND APPLICATION FOR THE LOCALIZATION OF ANTIGENS. P. K. Nakane y S. B. Pierce, en *J. Histochem. Cytochem.* 14: 929; 1966.

INTRACELLULAR LOCALIZATION OF BASEMENT MEMBRANE ANTIGEN IN PARIETAL YOLK SAC CELLS. A. Martínez-Hernández, P. K. Nakane y G. B. Pierce en *Amer. J. Pathol,* 76: 549; 1974.

REMOVAL OF BASEMENT MEMBRANE IN THE INVOLUTING BREAST. A. Martínez-Hernández, L. M. Fink, y G. B. Pierce en *Lab. Invest.,* 34: 455; 1976.

GLUTAMINE SYNTHETASE: GLIAL LOCALIZATION IN BRAIN. A. Martínez-Hernández, K. P. Bell y M. D. Noremberg en *Science,* 195: 1356.

JUEGOS MATEMATICOS

TIME. C. D. Broad en *Encyclopaedia of Religion and Ethics,* dirigido por James Hastings. Charles Scribner's Sons, 1922.

TRAVELERS IN TIME: STRANGE TALES OF MAN'S JOURNEYINGS INTO THE PAST AND THE FUTURE. Dirigido por Philip Van Doren Stern. Doubleday & Co., Inc., 1947.

SYMBOLISM AND BELIEF. Edwyn Bevan. Kennikat Press, Inc., 1968.

TALLER Y LABORATORIO

BOOMERANGS: MAKING AND THROWING THEM. Herb A. Smith. Gemstar Publications. Arun Sports, Littlehampton. Sussex. 1975.

MANY HAPPY RETURNS: THE ART AND SPORT OF BOOMERANGING. Benjamin Ruhe. The Viking Press, 1977.

ERRATUM

En la página 103 del número 30, marzo último, donde se lee ESTADO 1 debe leerse ESTADO 3, y a la inversa.

Taller y laboratorio

Más sobre los bumerangs: ¿Qué relación guardan éstos con las pelotas de golf?

Jearl Walker

Describíamos, el mes pasado, los mecanismos básicos por los que un bumerang retorna a la persona que lo lanza. Pero la explicación dejó sin aclarar algunos aspectos llamativos del diseño y del vuelo de dichos ingenios. Comenzaremos, en esta nueva ocasión, por aclarar tales aspectos, para luego detallar cómo experimentar con bumerangs construidos con las técnicas que desarrollamos en el último número de la revista.

Característica interesante de ciertos bumerangs antiguos es su superficie rugosa. Algunos de los modelos más antiguos encontrados en Australia gozan de esa particularidad, como si la persona que los construyó pensara que con la superficie rugosa llegarían más lejos. Aunque la idea no parece muy acertada, podría ser correcta. La reacción inmediata es pensar que tal rugosidad aumenta el rozamiento entre la superficie del bumerang y el aire que lo rodea en cada instante, con lo que el aparato perderá velocidad más rápidamente y, por tanto, caerá al suelo mucho antes. Si una superficie rugosa ha de privilegiarse, no lo será, por supuesto, desde el punto de vista del rozamiento. De alguna otra manera, deben estar implicadas otras cuestiones.

Muchos objetos que nos son familiares tienen también rugosa la superficie, al objeto de que dure más su tiempo de vuelo. La pelota de golf, con su superficie salpicada de hoyitos, constituye el ejemplo más conocido. En los primeros tiempos del golf, todas las pelotas eran lisas, como intuitivamente se sugería que debiera ser. Pero casualmente alguien cayó en la cuenta de que las bolas peladas y con marcas por el uso llegaban, al parecer, mucho más lejos que las lisas, aun siendo golpeadas de igual manera. A partir de entonces, se fabricaron las pelotas con hoyuelos. En una ocasión Ascher H. Shapiro hizo pruebas comparativas entre una bola lisa y una bola con hoyuelos; halló que esta última alcanzaba una distancia más de cuatro veces mayor que la lisa, a pesar de la diferencia de rozamiento con el aire.

¿Cómo cooperan con el vuelo los hoyuelos de la superficie de un objeto? La respuesta está en el comportamiento del aire que rodea a la bola de golf con hoyuelos o al bumerang de superficie rugosa en su movimiento. Con el fin de simplificar, consideremos primero el comportamiento del aire que rodea en su vuelo a una superficie de sustentación. La mayor parte del aire que pasa a su alrededor no se ve afectada por las fuerzas de viscosidad, que son las fuerzas de rozamiento que se crean entre dos capas de aire, o bien entre una capa de aire y la superficie del elemento volador. Sin embargo, próxima a la superficie hay una capa de aire, llamada capa límite, que viene afectada en gran manera por las fuerzas de viscosidad. El aire más cercano a la superficie no se mueve; se mantiene en su sitio debido a la fuerza de rozamiento entre éste y la superficie. La capa próxima de aire tiene una velocidad baja. Al ir considerando estas capas estrechas, cada vez más alejadas de la superficie, se va descubriendo que las mismas se mueven a una velocidad cada vez menos afectada por las fuerzas de rozamiento con la superficie del aparato. El espesor de la capa límite se define como la distancia existente entre la superficie y el nivel a partir del cual puede despreciarse la fuerza de rozamiento. La clave del comportamiento de la pelota de golf con hoyitos y del bumerang con superficie rugosa está en el movimiento del aire en la capa límite.

La presión del aire alrededor de una superficie de sustentacion clásica es alta delante y detrás del aparato, relativamente más baja encima del mismo y más alta por debajo. En el último número explicábamos que la diferencia de presión entre la parte de arriba y la de abajo obedecía al principio de Bernoulli. Esta diferencia de presión permite que el aparato se sustente. Este mes veremos cómo el aire se mueve desde delante hacia atrás del aparato por la parte superior del mismo.

Consideremos dos pequeños volúmenes de aire, uno situado dentro de la capa límite y otro justo fuera de ella. Cuando en su movimiento se aproximan a la superficie de sustentación, frenarán su movimiento hasta detenerse en razón de la alta presión existente en la zona justo delante del aparato. Al alcanzar la parte de arriba del aparato (y debido a que se está moviendo), dichos volúmenes son acelerados a medida que los empuja la diferencia de presión existente entre la región frontal y la superior. El volumen situado en la capa límite tiene que vencer la acción de las fuerzas originadas por la viscosidad, cuya acción se extiende hacia el exterior desde la superficie del aparato y, por ello, su movimiento se acelera menos. De ahí que, cuando los dos volúmenes pasan por encima del aparato, el situado fuera de la capa límite se mueve más de prisa.

Conforme los volúmenes se acercan a la parte posterior de la superficie de sustentación, se enfrentan con una presión creciente, que les va frenando. El volumen situado fuera de la capa límite llegará a pararse una vez que alcance la parte posterior de la superficie, comenzando a acelerarse un poco después del mismo debido a la alta presión que encontrará, y así conseguirá volver a tomar la velocidad que tenía antes de que empezara a pasar la superficie de sustentación. El volumen situado dentro de la capa límite que inicia su movimiento hacia la parte de atrás es más lento y, en consecuencia, puede llegar a detenerse antes de haber alcanzado la parte posterior. Si se llega a parar, la alta presión existente en la zona de atrás puede hacerlo incluso retroceder, lanzándolo hacia la parte superior de la superficie de sustentación; ello provoca que tenga que subir aire de la parte de abajo para reemplazarlo. Este flujo empujará hacia fuera de la superficie el aire de la capa límite. Tal efecto recibe el nombre de "separación" y tiene gran influencia en

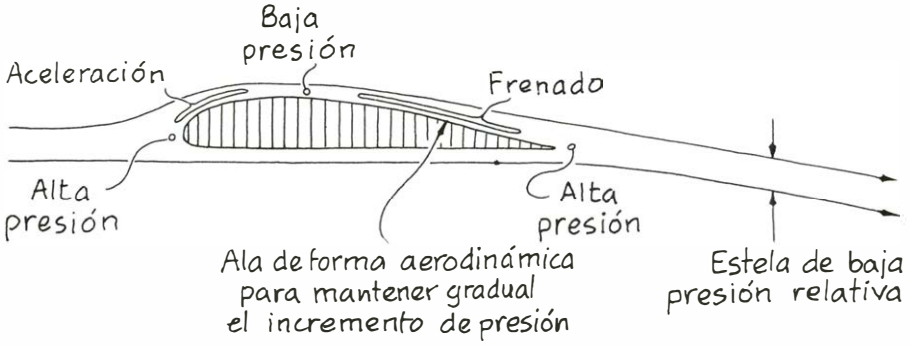
la resistencia al avance en superficies de sustentación.

Parte de esta resistencia al avance proviene del rozamiento existente entre el aire y la superficie de sustentación. Y podría denominársele resistencia debida al rozamiento superficial. Otro factor que influye en la oposición al avance es la diferencia entre la presión media existente delante y la que ocurre detrás de la superficie. Si las presiones medias son más o menos iguales, su contribución es pequeña; entonces, con tener en cuenta sólo la resistencia debida al rozamiento superficial es suficiente. Sin embargo, en algunos casos la diferencia de presión resulta tan elevada que su influencia es incluso mayor que la del rozamiento superficial. Una situación tal puede producirse cuando la capa límite se separe de la superficie, dejando una estela relativamente ancha de aire turbulento, en el lugar donde antes existía una alta presión. La presión de la turbulencia es intermedia entre la baja presión en la parte superior de la superficie de sustentación y la alta presión delantera. Así, la diferencia de presión entre la parte delantera y la trasera puede ser grande, dando lugar a la aparición de una fuerte resistencia al avance. Cuanto más adelante se produzca la separación en el paso del aire por encima de la superficie, tanto mayor será la resistencia debida a la diferencia de presión. Con una pronta separación, la presión en la estela es menor y, más ancha, la propia estela; ambos efectos reducen la presión media en la parte posterior del aparato.

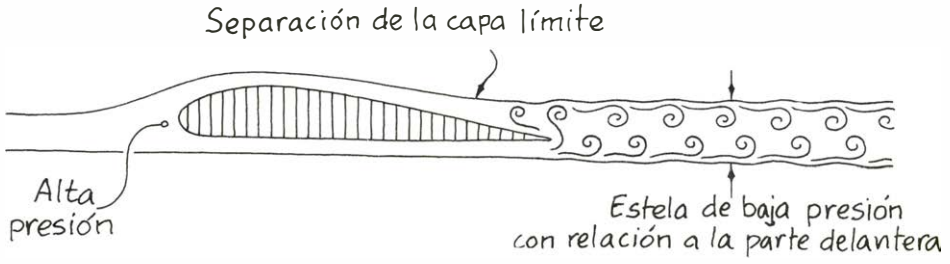
Una bola de golf lisa es un objeto uniforme en el cual la capa límite se separa rápidamente, tal vez antes de haber recorrido la mitad de la distancia hasta la parte posterior. Los hoyuelos de la pelota tienen por finalidad retrasar dicha separación (podría darse a la bola una forma aerodinámica para conseguir el mismo resultado, pero una pelota de golf en forma de ala de avión no rodaría bien por el césped). Al principio, el efecto de los hoyuelos parece contradecir la intuición, ya que lo lógico es que incrementen la resistencia al avance al aumentar el rozamiento superficial. Sin embargo, la reducción de la diferencia de presión es tan grande que, en conjunto, la resistencia al avance se hace menor y, como consecuencia, la pelota alcanza una distancia considerablemente mayor.

Los hoyuelos están diseñados de suerte que provoquen una turbulencia en la capa límite, la cual mezcla rápidamente el aire de dicha capa con el exterior. En virtud de ello, el aire de la capa límite no mengua su velocidad con respecto al exterior, pues continuamente está recibiendo impulso por parte de este último. Cuando el aire de la capa límite pasa por la parte superior de la bola en dirección hacia la región posterior, no se ve detenido en su movimiento hasta alcanzarla, ya que no basta la alta presión de esa zona para empujarlo hacia fuera de la superficie. De ello resulta que la estela es relativamente estrecha y la diferencia de presión entre la parte anterior de la bola y su parte posterior no es tan grande como lo sería en el caso de que tuviera lisa su superficie.

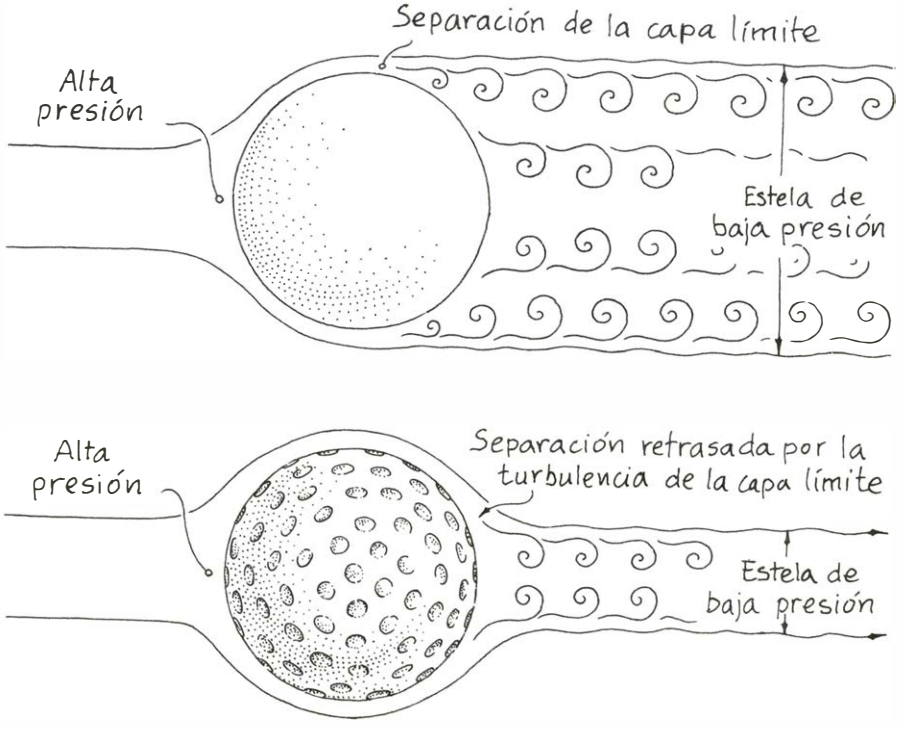
Durante los últimos años cierta casa comercial ha estado ofreciendo bolas con un nuevo diseño de los hoyuelos. Se ha cambiado la distribución regular de hoyuelos circulares por una distribución aleatoria de otros hexagonales. La base



Distribución de la presión del aire alrededor de una superficie de sustentación



Separación de la capa límite



Cómo se comporta una corriente de aire al ladear una pelota de golf lisa y una pelota con hoyuelos

de dicho diseño ha sido las investigaciones de John Nicolaides, de la Universidad de Notre Dame. Según los informes, la bola alcanza una distancia media de 6 metros más que la bola tradicional. No conozco la razón, pero quizá la causa sea la creación de una turbulencia más adecuada en la capa límite.

Recientemente he visto una demostración del efecto de la bola con hoyuelos en el Ontario Science Centre, en Toronto. Se unía una pelota lisa a una barra; ésta se hallaba sujeta, de forma articulada, por su parte superior a un soporte; la bola podía moverse así en caso de que una corriente de aire incidiera directamente sobre ella. Otra pelota, ésta con hoyuelos, se montaba de igual manera. Al provocar la corriente de aire, aquella pelota que ofreciera menos resistencia se desplazaría menos; por tanto, sería la bola cuya barra soporte se desviaba menos de la vertical. Cuando conectamos la corriente de aire, observamos que era la bola con hoyuelos la que tenía un desplazamiento más pequeño; era, pues, la que ofrecía una resistencia menor.

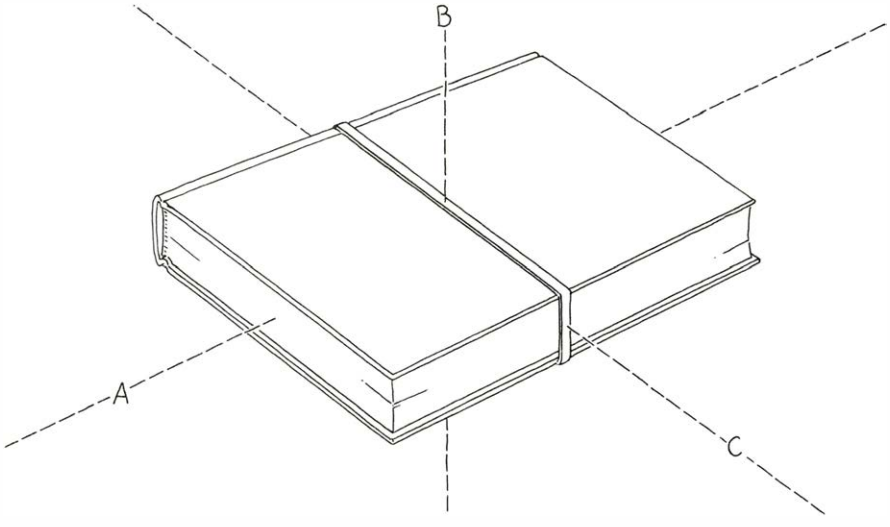
¿Habría que practicar hoyuelos –rugosidades– en la superficie de un bumerang? Tal vez. Deberíamos pensar en la probabilidad de que se produzca la separación en una superficie de sustentación moviéndose a una velocidad moderada, como ocurre en un bumerang. Cuando los investigadores estudian la corriente de un fluido sobre un objeto, deben poder comparar las diversas probabilidades de separación y turbulencia obtenidas empleando fluidos diferentes (con densidades y viscosidades distintas) y objetos asimismo diferentes (para comparar tamaños). Al acometer las comparaciones, se usa un número adimensional llamado número de Reynolds. Se llama así en honor de Osborne Reynolds, quien contribuyó grandemente al análisis de la dinámica de fluidos en el siglo XIX. El número se calcula a partir de la densidad y velocidad del fluido multiplicado por una dimensión típica del objeto y dividido por la viscosidad del fluido. Cuando el número de Reynolds es alto, pueden presentarse la separación y la turbulencia, la capa límite es turbulenta y en este caso se dice que el flujo es sólo ligeramente viscoso. Aunque el fluido tenga una alta viscosidad, puede ocurrir normalmente que bajo determinadas condiciones se tenga un número de Reynolds alto y que entonces la corriente de fluido se comporte como si no hubiera viscosidad. Una diferencia de presión dada impulsando a un volumen de fluido provocará una aceleración de dicho volumen, que dependerá de la densidad del fluido más que de la viscosidad.

Si el número de Reynolds es bajo, no ocurren ni la separación ni la turbulencia, la capa límite es laminar y el flujo se dice que es viscoso. De nuevo, su comportamiento no depende directamente del valor real de la viscosidad, que de hecho puede ser más bajo. Cuando el número de Reynolds es bajo, la diferencia de presión que impulsa la parcela de fluido queda contrarrestada en casi su totalidad por las fuerzas opuestas de la viscosidad, con lo que resulta una aceleración mínima.

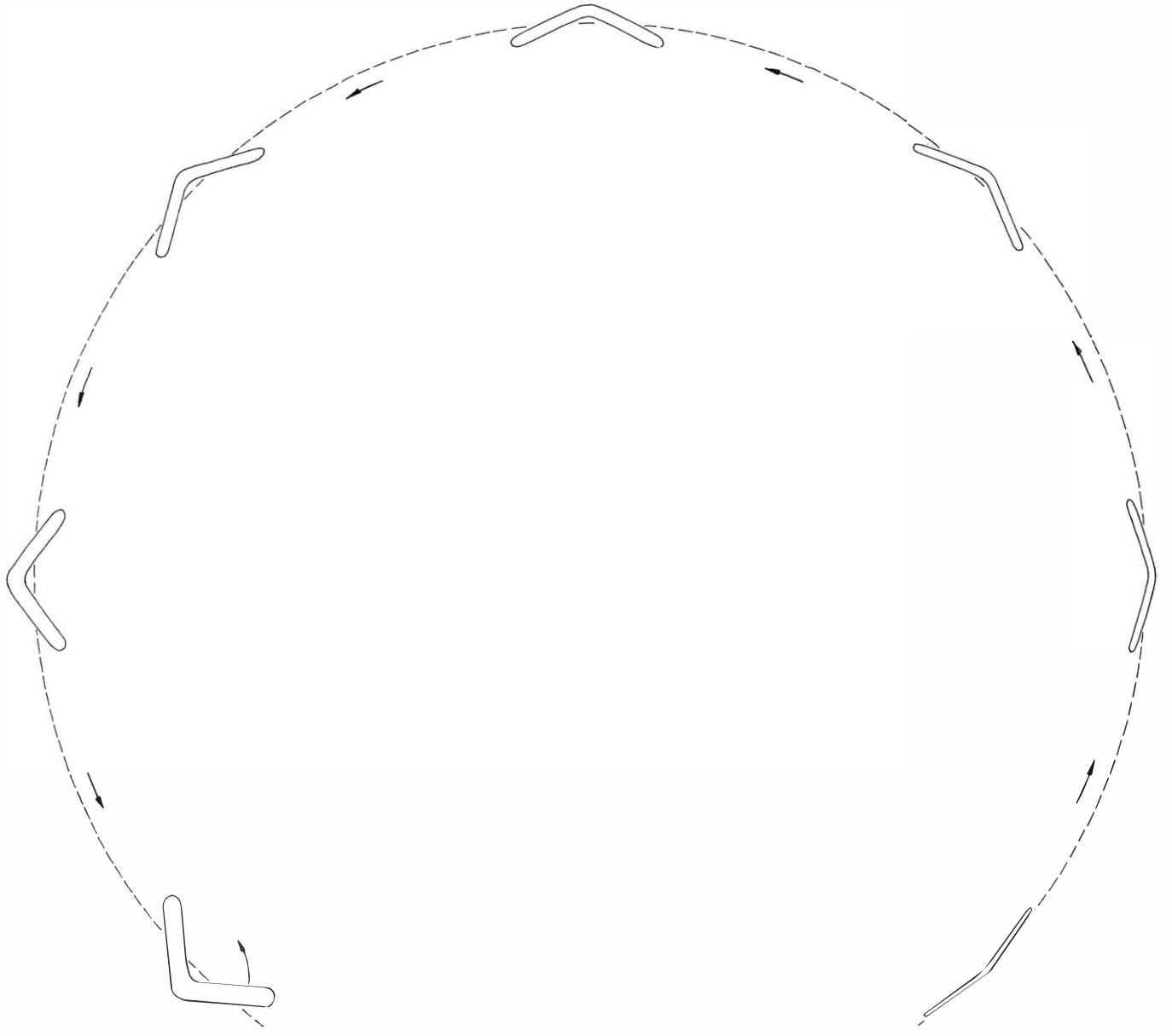
Para una pelota de golf, el número de Reynolds tiene un valor intermedio, lo suficientemente alto como para que se produzca muy probablemente la separación y la turbulencia en la estela, pero no lo bastante alto como para que la capa límite sea turbulenta. Está justificado practicar hoyuelos en la superficie (incluso a costa de aumentar el rozamiento superficial). ¿Qué pasa con el bumerang? Desgraciadamente, el número de Reynolds de un bumerang típico también se sitúa más o menos en el centro de la escala de valores, haciendo con ello que el efecto de la rugosidad superficial quede poco claro. Si el comportamiento de un bumerang concreto no está muy afectado por una rápida separación de la capa límite, hacer rugosa la superficie no es eficaz, puesto que la resistencia total al avance se vería incrementada por la resistencia adicional debida al rozamiento superficial. Por el contrario, si el comportamiento de un bumerang viniera condicionado de forma decisiva por una separación rápida, el hacer rugosa la superficie puede incrementar su tiempo de vuelo.

Una cuestión afín que puede reducir la probabilidad de que se produzca la separación radica en que el objeto tenga o no tenga forma aerodinámica. Las alas de los aeroplanos tienen forma aerodinámica para reducir la separación y la resistencia al avance causada por la diferencia de presión. ¿Deberían tener tambien forma aerodinámica los brazos de un bumerang? Para simplificar, consideremos de nuevo una superficie de sustentación ideal. Cuando el aire de la capa límite se mueve sobre la parte superior en dirección a la parte posterior, halla un progresivo incremento de la presión que retarda su avance hasta pararlo y origina una separación. Si el recorrido hasta la parte posterior es corto, el incremento de la presión es muy rápido y la separación puede resultar inevitable. De ahí que un objeto tal como un aeroplano tenga una parte posterior afilada con el fin de conseguir que el incremento de presión sea gradual. La forma afilada también incrementa la zona a través de la cual el aire pasa rozando contra la superficie. Con todo, al evitar la separación, se compensa el incremento de oposición al avance.

Saphiro da un ejemplo de formas aerodinámicas en su libro *Shape and Flow: The Fluid Dynamics of Drag*. En él compara la resistencia global al paso de una corriente de aire a 340 kilómetros por hora que presentan un alambre cilíndrico y una superficie de sustentación aerodinámica; llega a la conclusión de que el alambre ofrece a la corriente de aire la misma oposición que la superficie de sustentación, siendo ésta 10 veces más ancha. La intuición nos sugiere que la superficie mucho más gruesa de sustentación presentará una oposición mucho mayor, pero la intui-



Los tres ejes principales de rotación de un libro



Así se "tumba" un bumerang en vuelo

ción no siempre tiene en cuenta la sutileza de la separación de la capa límite y la oposición por la diferencia de presión. Cuando el número de Reynolds es alto, conviene dar forma aerodinámica al objeto.

Supongamos que el fluido pasa alrededor del objeto de manera que el número de Reynolds sea lo suficientemente bajo como para que no ocurra la separación. El dar forma aerodinámica al objeto (en virtud del incremento del rozamiento superficial) podría resultar perjudicial. Por contra, el objeto tiene que ser redondeado, presentando al aire la menor superficie posible.

¿Deben tener forma aerodinámica los brazos de un bumerang? Probablemente sí, pero no he encontrado ninguna razón definitiva en que basar mi suposición. Una vez más, el número de Reynolds para un bumerang normal está en la incómoda zona del centro, por lo que no tenemos claro si basta la separación para justificar el incremento del rozamiento superficial que traería consigo el que un bumerang tuviera los brazos con forma aerodinámica.

Podemos preguntarnos por qué ningún bumerang tiene forma de un palo recto. Ni siquiera un palo recto, convenientemente redondeado por un lado y afilado por el otro para que adquiera forma aerodinámica, serviría como bumerang. La razón es sutil, pues hay que tener en cuenta la estabilidad de un objeto en rotación sometido a las pequeñas perturbaciones que sufre en su camino.

Supongamos que atamos un libro con una banda elástica resistente de suerte que permanezca siempre cerrado, y que lo lanzamos al aire. Tal como muestra la ilustración de la página opuesta, el libro puede girar alrededor de tres ejes principales. La rotación alrededor de dos de ellos (el *A* o el *B*) es estable, pero alrededor del tercer eje (el *C*) se balanceará al girar.

Los ejes se caracterizan por el modo en que se distribuye la masa del libro con respecto a ellos. Cuando el libro gira alrededor del eje *A*, su masa está distribuida de la forma más próxima posible al eje. El momento de inercia del libro con respecto a dicho eje es mínimo. Por el contrario, el momento de inercia respecto al eje *B* es máximo, debido a que la masa del libro se halla distribuida de la forma más alejada posible con

respecto al eje. Para el eje *C*, el momento de inercia tiene un valor intermedio; por eso, la rotación del libro alrededor de este eje es inestable.

La estabilidad depende de lo que haga el momento angular del libro cuando éste se desvíe ligeramente de la dirección paralela al eje principal respecto al cual el libro está girando. (El momento angular del libro es un vector que tiene por magnitud la velocidad angular multiplicada por el momento de inercia, y por dirección la perpendicular al plano sobre el cual el libro está girando.) Para dos de los ejes principales (*A* y *B*), cualquier desviación del vector momento angular es corregida rápidamente volviendo a su posición inicial paralela al eje principal. Mientras que, para el eje *C*, cualquier desvío del vector de su posición paralela al eje de giro hace que aumente más todavía el desvío. Si se consigue que el libro gire alrededor del eje inestable con su vector momento angular exactamente paralelo al eje *C*, el libro rotará de forma estable. Pero cualquier desvío de dicha condición de paralelismo (cosa probable que suceda) se incrementará rápidamente durante el vuelo y hará que el libro cabecee. Si el momento angular máximo y el intermedio son casi iguales, como sucedería si el libro fuese cuadrado, los giros alrededor de cualquiera de los ejes con ellos asociados serán inestables.

El bumerang típico en forma de banana gira alrededor del eje sobre el cual el momento de inercia es máximo y, por ello, su giro y su vuelo son estables. Sin embargo, con un bumerang recto, el momento de inercia máximo y el intermedio serían casi iguales, por cuya razón el bumerang resultaría inestable. El balanceo impediría que el bumerang chocase con el aire con el ángulo de ataque adecuado; en consecuencia, el aparato no se sustentaría. En resumen, un bumerang recto no es un bumerang.

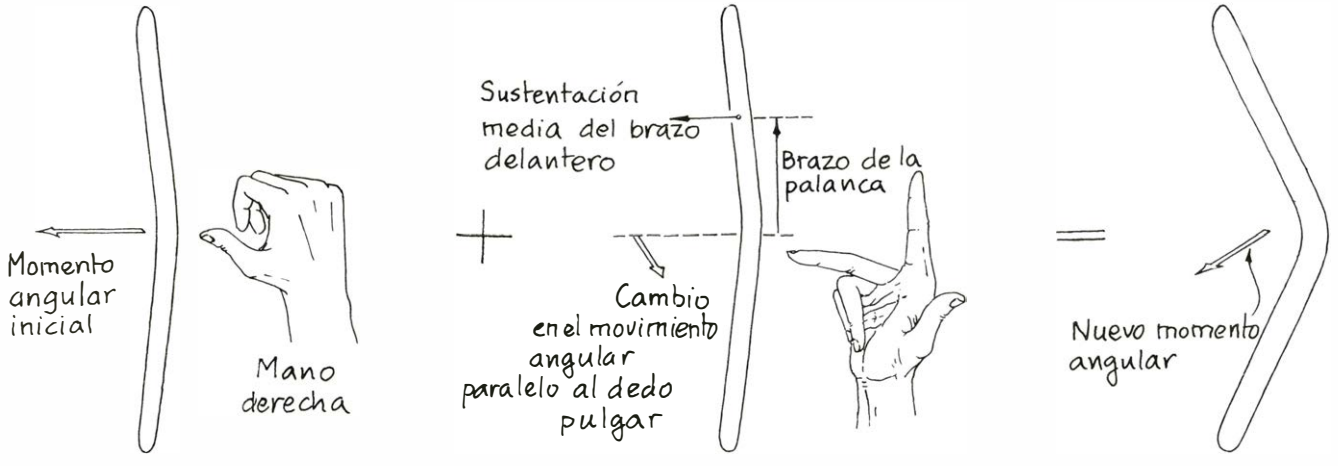
Una característica curiosa de un bumerang regular es su tendencia a "tumbarse", es decir, a que su plano de giro pase, de ser casi vertical, a ser horizontal. Al comienzo del vuelo, la velocidad del bumerang es suficientemente grande, de manera que el plano de giro sólo necesita estar ligeramente desviado de la vertical para proporcionar la fuerza de sustentación necesaria y contrarrestar el peso del bumerang. A medida que el roce del aire va frenando la velocidad, la fuerza de sustentación debe tener una componente vertical progresivamente mayor para mantener elevado el bumerang. Cuando éste regresa al lanzador, el plano de giro es casi horizontal.

Se pueden identificar dos posibles causas de esta variación del plano de rotación. Una, que es cierta para todos los tipos de bumerang, concierne al aire deflectado por el brazo que gira hacia adelante del centro de masa del bumerang. Siempre que un brazo gira hacia adelante, deflecta la corriente de aire que pasa, la cual fluye (ligeramente después) alrededor del otro brazo a medida que el bumerang avanza. Así pues, el brazo posterior se encuentra con aire ya perturbado y no sufre la misma elevación que el brazo anterior.

Así, un bumerang que acaba de ser lanzado por una persona con su mano derecha registra una fuerza de sustentación horizontal hacia la izquierda del lanzador. Cuando el aire abandona el brazo delantero, es deflectado hacia la derecha del lanzador. (Según las leyes de Newton sobre el movimiento, cada acción tiene una reacción igual y opuesta. Si el bumerang es lanzado hacia la izquierda por el aire, éste debe ser lanzado hacia la derecha en la misma proporción.) Cuando el brazo posterior gira en el aire, que a su vez está moviéndose hacia la derecha, registra una elevación algo menor que el brazo delantero porque el aire no impulsa al bumerang con el ángulo de ataque óptimo. (El ángulo de ataque puede, incluso, ser negativo.) Resulta, pues, que a medida que un bumerang gira, el brazo delantero experimenta siempre una sustentación algo superior a la del posterior.

La diferencia de fuerzas tiende a desequilibrar el plano de giro, de forma que la parte trasera del bumerang oscila hacia la derecha (visto por el lanzador) y la delantera hacia la izquierda. Como indicamos el mes pasado, esta leve inclinación no se debe a que el bumerang esté girando y tenga momento angular. Sucede, en realidad, que el par resultante de las fuerzas hace que el plano de giro precese, es decir, gire sobre un eje horizontal hasta que el ángulo de giro se vuelve horizontal al final del vuelo.

Para entender esta tendencia a situarse en un plano horizontal, imaginemos una vista aérea de un bumerang recién lanzado por la mano derecha con el plano de giro vertical y, por tanto, con su vector momento angular hacia la izquierda del lanzador. En promedio, la sustentación por delante del centro de masa es mayor que detrás de dicho centro, debido al aire deflectado con el que se encuentra la región posterior del bumerang. Para simplificar las cosas, consideremos que la elevación posterior es nula (el resultado de este razonamiento es el mismo aun cuando se dé a esta elevación su valor real). El cambio del momento angular obedece al par causado por la fuerza de sustentación media en la sección delantera. Para situar la dirección del cambio hay que emplear la regla dada el mes pasado: coloque el dedo índice de la mano derecha señalando desde el centro del



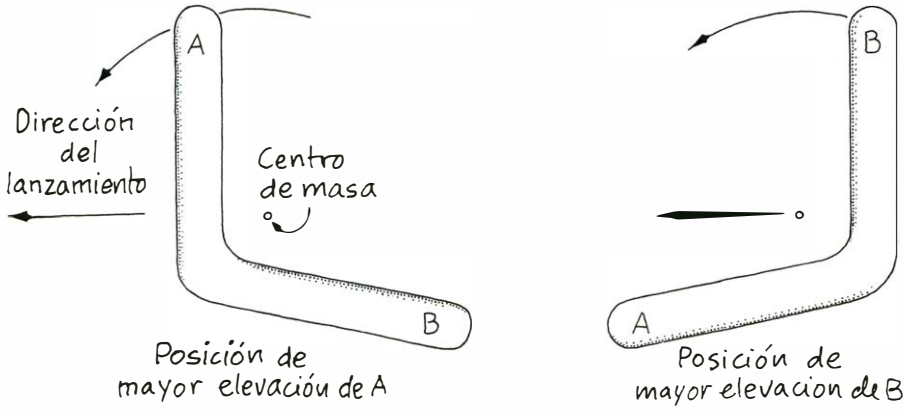
Cambio del momento angular a medida que desciende un bumerang

bumerang hacia el lugar donde se aplica la fuerza de sustentación en el brazo del bumerang, sitúe el dedo corazón paralelo a la sustentación y estire el pulgar perpendicularmente a ambos dedos. El pulgar señalará la dirección del cambio en el momento angular, que será ascendente, perpendicular al momento angular existente.

Dado que el momento angular inicial está dirigido hacia la izquierda y el cambio es ascendente, el vector momento angular gira para ser más ascendente, haciendo que el plano de giro del bumerang gire también, y pase de vertical a horizontal. El bumerang ha empezado a descender. Esta rotación, llamada precesión porque se trata de una rotación del vector momento angular, continúa durante el vuelo. Cuando el bumerang regresa al lanzador, el plano de giro es casi horizontal y la fuerza de sustentación del bumerang está casi totalmente dirigida hacia arriba.

La segunda causa posible de que al final el plano de rotación sea horizontal es similar. Quizás un brazo tenga una forma que origine una fuerza de sustentación mayor que el otro (en la ilustración de esta misma página, el brazo con mayor sustentación se indica por *A* y al otro por *B*). Ambos brazos originan la máxima sustentación cuando se mueven hacia arriba (como mencioné el mes pasado), porque la velocidad del aire que pasa por el brazo es mayor cuando el brazo está girando en el aire que viene a su encuentro. Cuando *A* se halla en su posición óptima, coincide con el centro de masa. Cuando *B* está en su posición óptima, se encuentra detrás del centro de masa. Si la máxima sustentación ejercida en *A* es siempre mayor que la ejercida en *B*, como se determinará por la forma de sección transversal de los brazos, la sustentación será en general mayor delante del centro de masa que detrás del mismo. Una vez más, la diferencia entre la fuerza delante del centro de masa y la fuerza detrás de él crea un par que hace que el plano de rotación se incline. Lo mismo que sucedía con el aire deflectado, el par hace girar el vector momento angular del bumerang, inicialmente horizontal, hasta una posición vertical, lo que induce al bumerang a tumbarse.

Si el bumerang no se tumbase, su vuelo resultaría más corto y menos interesante, porque en algún punto del vuelo la velocidad anterior sería demasiado baja para producir la suficiente fuerza ascendente que sostuviera al bumerang. Si éste desciende tan rápidamente que ya esté horizontal a mitad del vuelo, puede seguir precesando, cambiando su vector momento angular y, por tanto, inclinando su plano de giro por debajo del horizontal. El bumerang empezará entonces a curvarse en la dirección opuesta, y puede describir incluso una figura en forma de ocho antes de regresar a la persona que lo lanzó.



Posiciones de elevación máxima en los brazos de un bumerang en vuelo

No es más fácil construir un bumerang que vuele recto que otro que regrese. Hay que reducir, hasta casi su desaparición, la componente horizontal de la fuerza de sustentación, pero deberemos asignar a su componente vertical un valor tal que mantenga elevado el aparato a pesar de su peso. La sustentación horizontal se elimina torciendo los brazos para dar un ángulo negativo de ataque cerca de los extremos de los brazos y un ángulo positivo de ataque cerca del centro. La sustentación total se reduce, aunque no llega a anularse. Se lanza el bumerang con su plano de giro casi horizontal, de manera que la sustentación neta sea casi vertical.

Si lo arrojamos con un plano de giro a unos 20 grados por encima del horizontal, una pequeña fuerza de sustentación horizontal hace que el bumerang vuele en línea recta hacia la izquierda de la persona que lo lanzó. Un leve descenso determina que el plano de giro rote hasta ser horizontal, y entonces lo hace descender por debajo del plano horizontal. Luego, el ingenio cambia de dirección, inclinándose hacia la derecha del lanzador. Porque el recorrido no es perfectamente recto, el lanzador tiene que conocer bien su objeto de diversión, sobre todo si intenta alcanzar un blanco distante.

Durante muchos años se han venido dando explicaciones al vuelo y regreso de los bumerangs, pero muchas de ellas han sido erróneas y carentes de verificación experimental. Aunque la mecánica básica del vuelo de los bumerangs se conocía ya desde 1837, excepto en los aspectos relativos a la moderna teoría de la superficie de sustentación, parece ser que la información fue ignorada o mal entendida por autores posteriores. En 1897, G. T. Walker adelantó una explicación teórica clásica en su artículo "On Boomerangs" aparecido en las *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.

El tratamiento moderno más exhaustivo del tema de los bumerangs lo constituye la tesis doctoral de Felix Hess, incluida en la bibliografía. Hess repasa la vieja información y examina, teórica y experimentalmente, el comportamiento de los bumerangs. Su libro recoge algunas interesantes ilustraciones tridimensionales de vuelos simulados por ordenador que el lector puede examinar a través de un visor de estereoscopio que se encuentra al final de la obra.

Se están llevando a cabo investigaciones sobre bumerangs en túneles de viento, en donde los investigadores estudian los recorridos de las corrientes de aire en torno a un bumerang fijo. Pero aún quedan muchas cosas que pueden realizar los aficionados manejando sus propios aparatos construidos cuidadosamente. Si el lector se propone este objetivo, el primer problema será resolver qué hace el bumerang durante el vuelo, porque el lanzador estará sólo en un extremo del vuelo y le será difícil apreciar con exactitud la distancia y la altura. Para determinar la distancia habría que colocar a varios observadores a lo largo del recorrido. Para ver la altura, habría que medir el ángulo que forma el recorrido en el campo de visión. Conociendo la distancia y el ángulo podremos calcular la altura alcanzada por el bumerang.

Algunos investigadores han incorporado una luz al bumerang y lo han lanzado en la obscuridad, mientras mantenían abierto el objetivo de una cámara

fotográfica. El resultado es un trazado luminoso en la fotografía, que señala el recorrido del ingenio.

Hess publicó un artículo en el número de noviembre de 1968 de *Scientific American,* que aducía ejemplos de esta técnica. Pero con una cámara común resulta difícil apreciar la naturaleza tridimensional del trazado. E incluso disponiendo dos cámaras que fotografiasen el recorrido desde distintas perspectivas, no resultaría nada fácil combinar ambas informaciones para obtener la trayectoria tridimensional. Se pueden obtener mejores resultados si se fotografía el bumerang iluminado con la técnica estereoscópica descrita en esta sección en febrero pasado. Cuando se ponen las dos fotografías resultantes en un estereoscopio, se ve una imagen combinada con profundidad.

Hess y otros investigadores han iluminado los bumerangs incorporándoles un pequeño circuito de pilas, un oscilador eléctrico y una pequeña luz. La idea es buena, pero hay que encajar los objetos en la madera (como hizo Hess), porque de lo contrario éstos afectan a la corriente de aire en torno al bumerang. Las pilas y el oscilador van sujetos al centro del aparato y la lucecita se coloca en un brazo, de forma que el momento de inercia del bumerang se altere lo menos posible. También es válido el recurso a las bengalas para mostrar el recorrido del vuelo.

Existen muchas variables de investigación posibles si el lector quiere experimentar con los bumerangs. Aunque Hess ha hecho un trabajo muy bueno al simular vuelos de bumerangs con sus programas de ordenador, no ha dado directrices referentes a cuál sea el proyecto mejor, ni cómo mejorar el malo a base de pequeños cambios de construcción. Las principales variables son las referentes al lanzamiento y a la construcción. Un bumerang comprado puede servir para estudiar las variables de lanzamiento, pero será necesario que el lector se talle el suyo para examinar las variables de construcción.

Para investigar sobre el lanzamiento hay que buscar un espacio amplio y abierto, con poco viento. Se elegirá luego una variable y se mantendrán las otras constantes en cuanto sea factible. Sé que mantener las constantes de lanzamiento fijas resulta difícil, porque nunca se podrán repetir dos golpes sucesivos de la misma manera. Si se fotografía el lanzamiento con un tomavistas, se podrá comparar de forma objetiva el ángulo de lanzamiento, el giro y la velocidad en los distintos ensayos. ¿Hasta qué punto dependen, de la dirección del lanzamiento, la duración del vuelo, la distancia total recorrida, la altura máxima alcanzada (normalmente se lanza hacia el horizonte), el ángulo entre el plano de giro y la vertical (cuanto mayor sea el ángulo más empinado será el ascenso), la velocidad de rotación y la velocidad hacia adelante?

En los bumerangs caseros, ¿hasta qué punto depende el vuelo de la forma de la sección transversal de los brazos, de la curvatura y del peso? A mí me intriga, sobre todo, si vale la pena dar forma aerodinámica a los brazos. ¿Habría que afilar las puntas de los brazos? ¿o convendría que estuvieran redondeadas? ¿Debe ser el bumerang estrecho en el centro y más ancho en los extremos de los brazos? ¿Cambia el vuelo si el borde frontal está afilado en lugar de ser romo?

Puesto que no se conoce el efecto de la rugosidad de la superficie, quizás al lector le interese resolver la cuestión. En lugar de hacer agujeros o muescas en un bumerang de madera, se podría intentar fijar cinta de celofán que sea adhesiva por ambos lados. La propia cinta puede crear una capa límite turbulenta o podríamos provocar una turbulencia salpicando arena en el adhesivo. Algunos investigadores han tratado de averiguar el efecto de la turbulencia colocando un cable fino justo delante del borde de ataque de cada brazo. Los resultados de Hess a este respecto no fueron definitivos.

Algunos entusiastas de los bumerangs de retorno han descubierto que, añadiendo lastre a los brazos, cerca de los extremos, se puede incrementar en mucho la distancia del vuelo de ida. En 1972, Herb A. Smith, cuyo diseño "Gem" para un bumerang describí el mes pasado, lanzó uno de este tipo hasta una distancia de casi 100 metros. Según el *Guinness Book of World Records,* éste es el vuelo más largo que se ha registrado. Smith sugiere que debe añadirse lastre hasta un total de un tercio del peso del bumerang y que se debe hundir éste (normalmente serán trozos de plomo) en agujeros hechos a una distancia de unos 2,5 centímetros de los extremos de los brazos. Si se añade peso en el centro, éste mantendría quizás al aparato en un vuelo más estable; pero se puede conseguir llegar a mayor distancia si se coloca el lastre cerca de los extremos, porque así se incrementa el momento de inercia. El aficionado podrá comprobar por sí mismo el efecto del lastre en su bumerang casero y, por si le interesaran los records mundiales, podría intentar mejorar el lanzamiento de Smith.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

ARMAS QUE UTILIZAN HACES DE PARTICULAS

THE PHYSICS OF FULLY IONIZED GASES. Lyman Spitzer, Jr. Interscience Publishers, 1956.

CLASSICAL ELECTRODYNAMICS. Págs. 309-390 y 429-463. John David Jackson. John Wiley & Sons, 1962.

ANTI-BALLISTIC-MISSILE SYSTEMS. Richard L. Garwin y Hans A. Bethe en *Scientific American,* vol. 218, nº 3, págs. 21-31; marzo, 1968

UN ENZIMA DE LA GLANDULA PINEAL QUE CONTROLA EL TIEMPO

PINEAL GLAND BIORHYTHMS: *N*-ACETYLTRANSFERASE IN CHICKENS AND RATS. Sue Binkley en *Proceedings of the Federation of Societies for Experimental Biology,* vol. 35. nº 12. págs. 2347-2352; octubre, 1976.

THE PINEAL. R. J. Reiter. Eden Press. 1977.

THE PINEAL GLAND: A. BIOLOGICAL CLOCK IN VITRO. Sue A. Binkley, J. B. Riebman y K. B. Reilly en *Science,* vol. 202, nº 4373, págs. 1198-1201: 15 de diciembre de 1978.

EVOLUCION DE LAS GALAXIAS DE DISCO

SPIRAL STRUCTURE, DUST CLOUDS, AND STAR FORMATION. Frank H. Shu en *American Scientist,* vol. 61. págs. 524-536: 1973.

GALAXIES AND THE UNIVERSE, VOL. 9: STARS AND STELLAR SYSTEMS. Dirigido por Allan Sandage, Mary Sandage y Jerome Kristian. The University of Chicago Press, 1975.

THE FORMATION OF GALAXIES. Richard B. Larson en *Galaxies: Sixth Advanced Course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics,* dirigido por L. Martinet y M. Mayor. Geneva Observatory, 1976.

CLUSTERS OF GALAXIES. Neta A. Bahcall en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 15. págs. 505-540; 1977.

THE ORIGIN OF GALAXIES. Richard B. Larson en *American Scientist,* vol. 65, págs. 188-196; 1977.

THEORIES OF SPIRAL STRUCTURE. Alar Toomre en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics.* vol. 15, págs. 437-478; 1977.

LA ARCILLA

DIE SILICATISCHEN TONMINERALE. Karl Jasmund. Verlag Chemie, Gmbtt., 1955.

APPLIED CLAY MINERALOGY. Ralph E. Grim. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962.

MINÉRALOGIE DES ARGILES. Simonne Caillère y Stéphane Hénin. Masson et Cie., 1963.

GÉOLOGIE DES ARGILES. Georges Millot. Masson et Cie., 1964.

TERATOMAS Y QUIMERAS

COMPARATIVE DEVELOPMENT OF NORMAL AND PARTHENOGENETIC MOUSE EMBRYOS, EARLY TESTICULAR AND OVARIAN TERATOMAS, AND EMBRYOID BODIES. Leroy C. Stevens en *Teratomas and Differentiation,* dirigido por Michael I. Sherman y Davor Solter. Academic Press, Inc., 1975.

TOTIPOTENCY AND NORMAL DIFFERENTIATION OF SINGLE TERATOCARCINOMA CELLS CLONED BY INJECTION INTO BLASTOCYSTS. Karl Illmensee y Beatrice Mintz en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 73, nº 2. págs 549-553; febrero, 1976.

TERATOCARCINOMA CELLS AND NORMAL MOUSE EMBRYOGENESIS. Christopher F. Graham en *Concepts in Mammalian Embryogenesis,* dirigido por Michael I. Sherman. The MIT Press, 1977.

CHIMERIC MICE DERIVED FROM HUMAN-MOUSE HYBRID CELLS. Karl Illmensee, Peter C. Hoppe y Carlo C. Croce en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 75, nº 4, págs. 1914-1918; abril, 1978.

GENETIC MOSAICS AND CHIMERAS IN MAMMALS. Dirigido por Liane B. Russell. Plenum Press, en prensa.

LA OSTEOMANCIA CHINA

THE BIRTH OF CHINA. Herrlee Glessner Creel. Frederick Ungar Publishing Co., 1937.

BONE CULTURE OF ANCIENT CHINA. William Charles White. The University of Toronto Press, 1945.

FIFTY YEARS OF STUDIES IN ORACLE BONE INSCRIPTIONS. Tso-pin Tung. Center for East Asian Cultural Studies. 1964.

COMPUTER MATCHING OF ORACLE BONE FRAGMENTS. Hung-hsiang Chou con la colaboración de David G. Opstad en *Archaeology,* vol. 26, nº 3, págs. 176-181; julio, 1973.

SOURCES OF SHANG HISTORY. David N. Keightley. University of California Press, 1978.

FISICA DEL KARATE

ASIAN FIGHTING ARTS. D. F. Draeger y R. W. Smith. Kodansha International, Ltd., 1969.

PHYSICS WITH ILLUSTRATIVE EXAMPLES FROM MEDICINE AND BIOLOGY, VOL. 1: MECHANICS. George B. Benedek y Felix M. H. Villars. Addison-Wesley Publishing Company, 1974.

KARATE STRIKES. Jearl D. Walker en *American Journal of Physics,* vol. 43, nº 10, págs. 845-849; octubre, 1975.

EVOLUCION DE LOS TRANSPLANTES DE CORNEA

CIRUGÍA DEL SEGMENTO ANTERIOR DEL OJO. VOL. II (CIRUGÍA DE LA CÓRNEA). Joaquín Barraquer y Joaquín Rutllán, Inst. Barraquer, 1969.

TALLER Y LABORATORIO

SHAPE AND FLOW: THE FLUID DYNAMICS OF DRAG. Ascher H. Shapiro. Anchor Books, Doubleday & Company, Inc., 1961.

MANY HAPPY RETURNS. Peter Musgrove en *New Scientist,* vol. 61, nº 882, págs. 186-189; 24 de enero de 1974.

BOOMERANGS, AERODYNAMICS, AND MOTION. Felix Hess. Conferencia del autor en 1975 (c/o. Dr. H. Rollema, Eikenlaan 51, Peize, Netherlands).

PROJECT BOOMERANG. Allen L. King en *American Journal of Physics,* vol. 43, nº 9, págs. 770-773; septiembre, 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

POLYOMINOES. Solomon W. Golomb. Charles Scribner's Sons, 1965.

GRAPH THEORY. Frank Harary. Addison-Wesley Publishing Company, 1969.

EXTREMAL ANIMALS. Frank Harary y Heiko Harborth en *Journal of Combinatorics, Information & System Sciences,* vol. 1, n.º 1, págs. 1-8; 1976.

Taller y laboratorio

Cómo medir el tamaño de la tierra con sólo una mira o un cronómetro

Jearl Walker

Por distintos conductos me han llegado dos ingeniosos procedimientos para medir el radio de la tierra. Los remiten Joseph L. Gerver, de Honolulú, y Denis Rawlins, de San Diego. Ambos procedimientos, además de ingeniosos, son lo suficientemente sencillos como para que cualquier aficionado pueda repetirlos. El lector se divertirá viendo cómo puede obtener valores muy cercanos al radio real de la tierra y cómo la introducción de sutiles variaciones en el método alteran los resultados.

El método de Gerver precisa de tres piedras, una cuerda y una regla. De acuerdo con sus indicaciones, se debe contar también con un cerro desde donde podamos divisar el horizonte del mar en dos direcciones opuestas. La altura ideal de esta colina o promontorio sería de 30 a 300 metros sobre el nivel del mar; desde ella se divisará claramente una zona de playa. Gerver hizo sus trabajos en Makapuu Point, en el extremo oriental de Oahu. El lector deberá tratar de encontrar una península similar. Puesto que parte del procedimiento implica la observación de dos piedras situadas en la playa, es necesario poder ver también la orilla. La última exigencia es una piedra puntiaguda o pivote que colocaremos como señal en la cima del cerro.

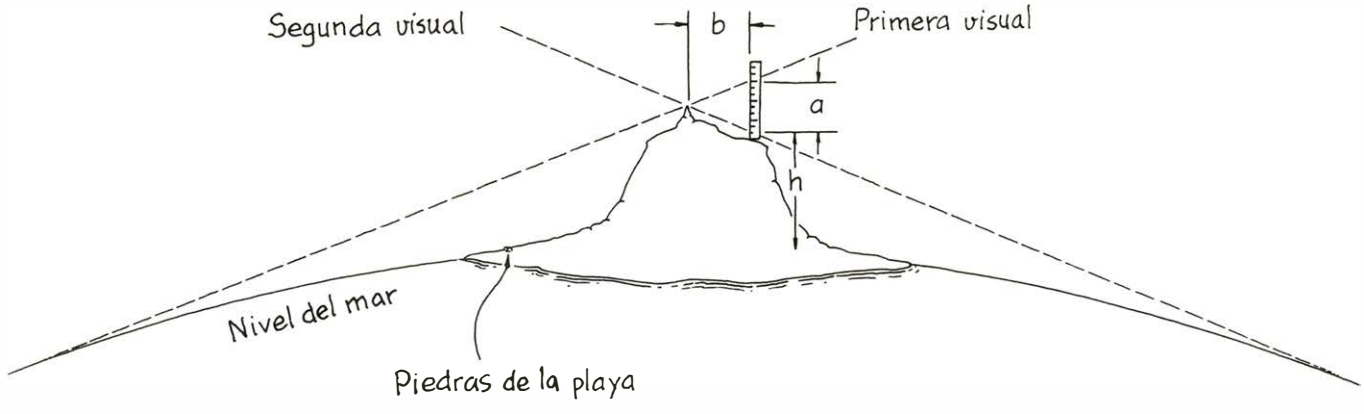
Situemos la regla en posición vertical a una distancia de unos 50 centímetros del pivote y midamos exactamente dicha distancia con la cinta. Gerver llama b al valor de la distancia. Para realizar la primera medición, el lector ha de colocarse de suerte que entre él y la piedra se encuentre la regla; irá ensayando la posición hasta que consiga ver alineados el horizonte, el extremo de la roca y un punto de la regla. Apuntará luego el punto de la regla en que la línea de visión corta la mira. Después debe moverse hacia la piedra, ajustando su línea de visión hasta que el extremo superior de la piedra esté alineado con el horizonte en la dirección opuesta. De nuevo ha de anotar el punto de intersección de su línea de visión con la mira (a a la distancia entre los puntos de intersección).

Por último hay que conocer la altura del observador sobre el nivel del mar. Para ello coloquemos dos piedras en la playa de manera que equidisten del observador y que, a su vez, estén separadas por una distancia conocida. Situados en el punto de observación y manteniendo la regla en el extremo de nuestro brazo y en posición horizontal, divisaremos las dos piedras, debiendo anotar la separación aparente que tienen sobre la mira. Giraremos luego la muñeca hasta colocar la regla en posición vertical para que, al divisar las piedras y la línea del horizonte, podamos anotar la distancia que separa las piedras del horizonte medida en unidades iguales a la distancia aparente entre las dos piedras. Multiplicando dicha distancia aparente [de las piedras al horizonte] por la separación real entre las dos piedras obtenemos la altura del observador sobre el nivel del mar, a la que llamaremos h. Finalmente calcularemos el radio de la tierra haciéndolo aproximadamente igual a $8h\ b^2/a^2$.

Por ejemplo, en una de las observaciones de Gerver, la distancia entre los dos puntos de intersección en la regla fue de aproximadamente 2,5 centímetros, la distancia entre la piedra y la mira 3,7 metros y el punto de observación estaba situado a 63,4 metros sobre el nivel del mar. Con estos datos el radio de la tierra que se calcula es de 10.500 kilómetros, que es apreciablemente mayor que el radio real de la tierra en el ecuador, que es de 6378 kilómetros (el radio polar real es de 6357 kilómetros). Repitiendo las observaciones se pueden reducir los errores aleatorios incorporados a las mediciones, pero los distintos errores sistemáticos permanecen.

¿Cómo funciona la fórmula de Gerver? La base geométrica, que se muestra en las ilustraciones de las dos páginas siguientes, implica cuatro triángulos fundamentales. Los cuatro son triángulos semejantes, esto es, tienen ángulos iguales. Gerver los empleará para establecer diferentes relaciones en las que están implicadas las tres medidas llevadas a cabo durante el experimento (a, h y b) y r, el radio de la tierra. Con ellas pudo despejar r.

Aquí vamos a esquematizar su demostración, pero dejaremos los detalles para el lector. A partir de los triángulos *1* y *2* podemos escribir la siguiente relación $CO/r = r/(r + h)$. A partir de los triángulos número *2* y *3* podemos decir que $AC/BC = CO/AC$. A partir de los triángulos *2* y *4* podemos establecer que $b/(a/2) = CO/AC$. Por último, tenemos que $BC = r + h - CO$. Eliminando CO, AC y BC a través de las correspondientes sustituciones en las relaciones anteriores podemos obtener r despejada. En un determinado momento del desa-



Método de Joseph L. Gerver para calcular el radio terrestre

rrollo de los cálculos, Gerver hace la aproximación de que la altura de la colina, en la que el observador se sitúa, es despreciable comparada con el diámetro terrestre. Dicha aproximación introduce un error en los cálculos de menos del 0,01 por ciento.

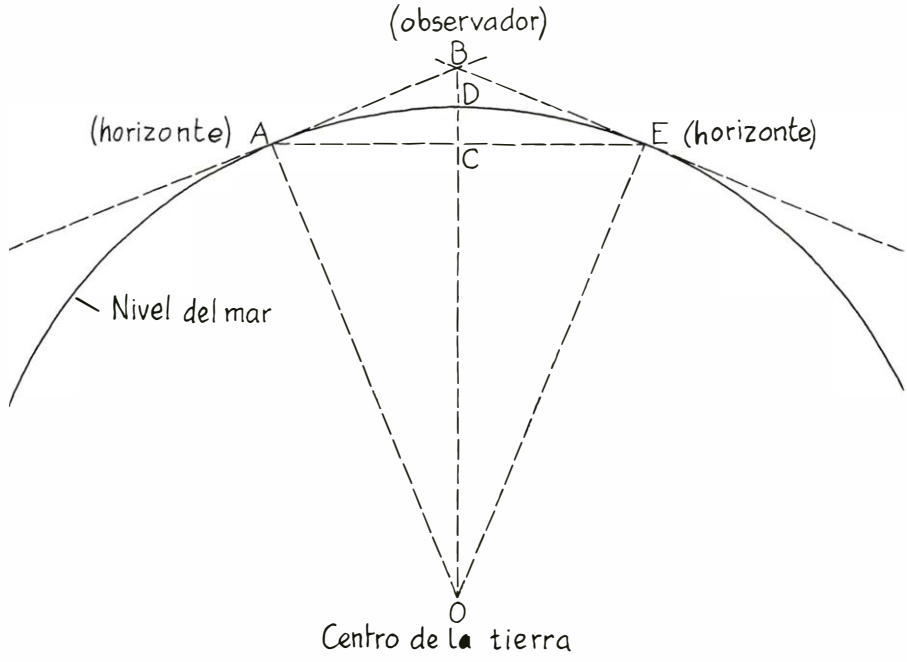
La altura *h* de la posición del observador sobre el nivel del mar se mide divisando los pivotes plantados en la playa. Gerver equipara la relación entre *h* y la separación real de las piedras a la relación existente entre la separación aparente de las piedras y la distancia aparente que hay entre las piedras y el horizonte oceánico más próximo a ellas. Como en el esquema de Gerver esta distancia se mide en unidades equivalentes a la separación aparente entre las mismas, se obtiene automáticamente la segunda de las dos relaciones propuestas. Cuando multiplicamos la segunda relación por la separación real entre las piedras, obtenemos la altura del observador sobre el nivel del mar.

Además de los errores fortuitos presentes en las observaciones, influyen también en el resultado varios errores sistemáticos. Uno de ellos provoca la curvatura de los rayos de luz tangentes al horizonte, que elevan ligeramente el campo de visión. Este efecto de refracción provocado por la atmósfera introduce un grado de error en los cálculos de Gerver demasiado elevado, aproximadamente del 20 por ciento. Hablaremos de este efecto más tarde, cuando describamos el método de Rawlins para medir el tamaño de la tierra.

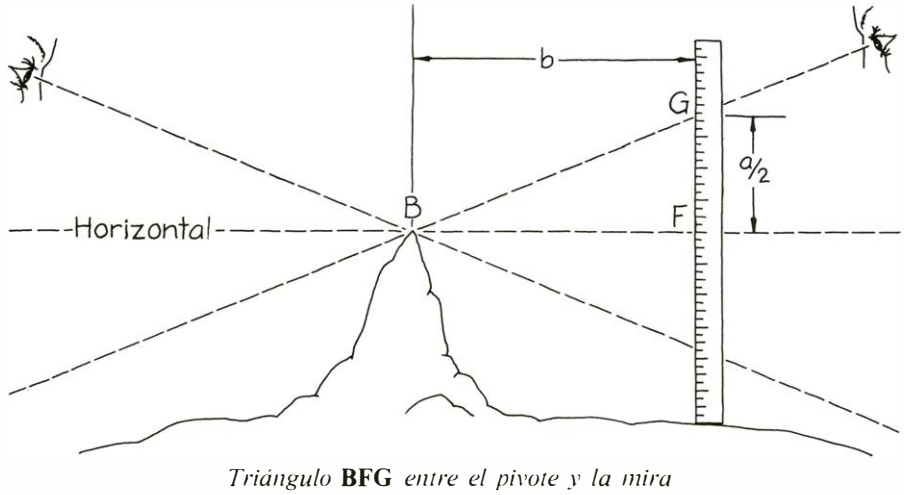
Otro factor a considerar son las olas del agua, que inciden al elevar el horizonte de nuestro campo de visión. Para eliminar ese efecto, se resta la mitad de la altura media de la ola (la mitad de la distancia entre cresta y valle dada por el Servicio de Guardacostas u otro organismo) del valor de *h* obtenido por el método de Gerver.

Otra causa de error aleatorio es la imposibilidad de ajustar perfectamente la alineación del horizonte del océano con el extremo superior de la piedra y con la marca en la regla. No se trata sólo del tipo de error que lleva consigo cualquier medición de una longitud, sino que además el error se acentúa porque esos elementos en particular no producen en la retina una imagen definida.

Y es fuente de error, asimismo, el cálculo de la altura de la atalaya de observación sobre el nivel del mar. El método de estimación de dicha altura, basado en la distancia existente entre las dos piedras situadas en la playa, supone que la línea que une el horizonte con las piedras de la playa es horizontal; la realidad es que está inclinada hacia abajo debido a la curvatura de la tierra. Dicho ángulo, que recibe el nombre de ángulo de inclinación, es proporcional a la raíz cuadrada de la altura del observador sobre el nivel del mar.



Geometría del método de Gerver



Triángulo **BFG** *entre el pivote y la mira*

Poniendo sumo cuidado en las observaciones, y multiplicándolas, el lector podrá aproximarse bastante al valor real del radio de la tierra, si sigue el método de Gerver. (Obviamente, no conseguirá medir el radio ecuatorial del planeta, sino el radio de curvatura local de la superficie del océano.)

Rawlins publicó su método para determinar el tamaño de la tierra en el número de febrero de la publicación *American Journal of Physics*. Básicamente, lo que Rawlins nos dice es que observemos dos puestas de sol en un corto intervalo de tiempo, una de ellas tendidos en la playa y otra poniéndonos de pie en el mismo sitio. Midiendo el tiempo transcurrido entre los dos ocasos se puede calcular el radio de la tierra con una aproximación del 10 por ciento más o menos.

Para poder llevar a la práctica el método de Rawlins, el observador deberá disponer de una clara visión del ocaso desde una playa donde se divise el mar en relativa calma o bien un gran lago. Para medir el tiempo conviene utilizar un cronómetro, pero puede servir también el segundero de un reloj de pulsera. Hay que prestar suma atención a la manera de mirar al sol. Si fijamos la mirada en él largo tiempo pueden resultar dañados los ojos. El mayor peligro viene de las radiaciones invisibles, que pueden perjudicar sin que provoquen molestias en el momento. Sería conveniente rehuir

la visión directa del disco solar hasta que esté en su mayor parte por debajo de la línea del horizonte. Debe seguirse la trayectoria del disco sin mirarlo fijamente o sólo contemplarlo a intervalos discontinuos y breves.

La base geométrica del método de Rawlins se muestra (para un observador situado en el ecuador) en la parte superior de la página siguiente. La primera puesta de sol se ve estando uno tendido en el punto M. En cuanto el último arco visible del disco solar se tienda en el horizonte, hay que levantarse rápidamente y esperar a que ocurra lo mismo, pero ahora desde la altura *h*, que es la altura de sus ojos. El último rayo de la primera observación es tangente a la superficie terrestre en el punto donde el observador se halla y, por tanto, forma un ángulo de 90 grados con la vertical, pero el último rayo de la segunda observación ya no es tangente. Con los ojos del observador situados por encima del nivel del mar, el horizonte del océano forma un ángulo (llamado θ en la figura) con la vertical, su valor es de 90 grados menos la depresión del horizonte (o ángulo de inclinación del horizonte).

El tiempo transcurrido entre la desaparición del último rayo de la primera observación y la desaparición del último de la segunda es proporcional a la depresión del horizonte θ, que es el ángulo que el sol recorre entre los dos ocasos. (En realidad éste es el ángulo girado por la tierra en dicho tiempo.) Si medimos el tiempo en segundos, la proporcionalidad está en el hecho de que a la rotación completa de la tierra le corresponden 86.400 segundos, es decir, 24 horas.

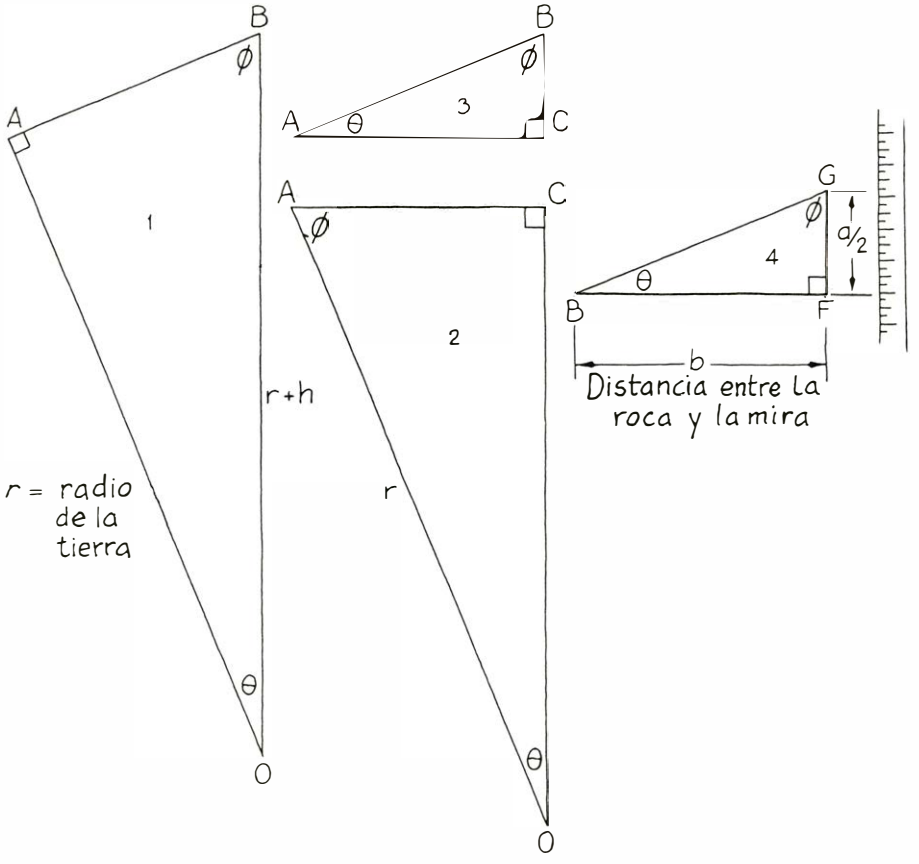
Rawlins admite que el triángulo *QNO* es un triángulo rectángulo y que, por tanto, entre sus lados se puede establecer la relación dada por el teorema de Pitágoras. Uno de sus catetos, *QN*, es aproximadamente igual al radio de la tierra multiplicado por el ángulo que ella recorre entre los dos ocasos. (El cateto es, por tanto, aproximadamente igual al arco entre los puntos *Q* y *M*.) Tomando este dato junto con la relación entre el ángulo y el tiempo transcurrido, Rawlins establece una ecuación que relaciona el tiempo entre los dos ocasos, el radio de la tierra y la altura *h* del nivel de los ojos del observador. (Y supone algo más: la altura de los ojos del observador *h* es despreciable si se la compara con el radio terrestre.) El radio de la tierra en kilómetros es igual a una constante de proporcionalidad, cuyo valor es $3{,}78 \times 10^5$, multiplicada por la altura del nivel de los ojos, *h*, expresada en metros y dividida por el cuadrado del tiempo transcurrido entre los dos ocasos (expresados en segundos).

Si la primera observación no se hace al nivel del mar, la altura a emplear en los cálculos no se deduce tan fácilmente. Supongamos que hacemos la primera observación a la altura normal de los ojos *h*, estando de pie en la playa y que la segunda observación la hacemos después de haber subido un tramo de escalera. La diferencia de altura efectiva para el cálculo es el cuadrado de la diferencia de las raíces cuadradas de las dos alturas de las observaciones. Más adelante daremos un ejemplo de estos cálculos.

Aunque la situación ideal para hacer las observaciones sea un océano o un lago en calma, lo más probable es que haya que contar con el movimiento de las olas. Estas complican las observaciones de dos maneras. Primero, porque las olas de la orilla ocultan la línea del horizonte cuando se está tendido en la playa para hacer la primera observación. Por ello, la primera observación se debe hacer desde un punto más elevado que la altura de las olas. Segundo, porque las olas en la línea del horizonte, que se hallan a unas millas de distancia, elevan éste. Para corregir ese desplazamiento, se aconseja estimar una altura media de las olas y restar dicha altura de cada una de las alturas de las que vamos a efectuar las observaciones. Rawlins, basándose en mediciones oceanográficas, consideró que la altura media de las olas más distantes era de 0,6 metros.

Debe realizarse una corrección sutil con la curvatura de los rayos producida por la refracción en la atmósfera de la tierra. Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro que tenga diferente índice de refracción, su trayectoria se modifica en la superficie de separación de ambos medios. Sólo hay una excepción a lo anterior, que se produce cuando el rayo de luz es perpendicular a la superficie de separación; en ese caso, no se modifica la trayectoria del rayo. La amplitud de la desviación en todas las demás ocasiones depende del ángulo de incidencia del rayo con la superficie de separación y de la diferencia entre los índices de refracción de ambos medios. La dirección de la desviación depende de si el índice de refracción aumenta o disminuye al cruzar la superficie de separación. Si el índice aumenta, el rayo se acerca a la perpendicular y si decrece, se aleja.

Conforme un rayo solar atraviesa la atmósfera terrestre, lo más probable es que se refracte de forma gradual al ir



Triángulos semejantes usados en los cálculos de Gerver

atravesando capas de aire que presenten ligeras diferencias de densidad entre sí y, por tanto, diferentes índices de refracción. La extensión de la desviación es insignificante si la luz tiene una trayectoria casi vertical, pero si el rayo atraviesa la atmósfera con un ángulo grande respecto a la vertical, como ocurre en la puesta del sol, la refracción puede tener un valor significativo.

Si el lector es aficionado a la astronomía probablemente conocerá el efecto de la refracción en las estrellas. Cuando una estrella se encuentra cerca de nuestra vertical, se observa en su posición correcta pues la luz procedente de ella no se refracta demasiado. Sin embargo, cuando una estrella se encuentra justo sobre el horizonte se ve ligeramente fuera de su posición real (el exceso de altura es de alrededor de medio grado en el horizonte), debido a que, cuando el rayo de luz llega a nuestros ojos ha atravesado la atmósfera con un ángulo muy grande respecto a la vertical, lo que hace que venga notablemente refractado. La refracción hace que la estrella parezca tardar más en ponerse debido a que cuando ya está realmente una fracción de grado por debajo del horizonte, la curvatura de sus rayos luminosos hace que su imagen aparezca por encima del horizonte.

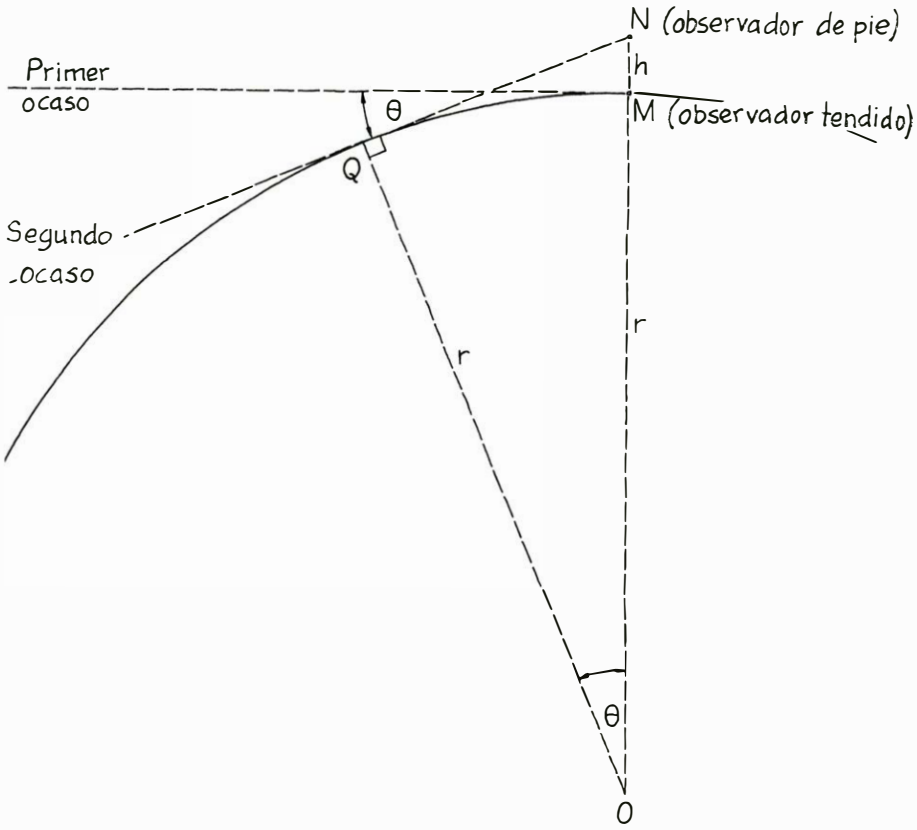
Lo mismo ocurre con el sol, el cual vemos incluso un poco después de ponerse tras el horizonte. Por suceder otro tanto cuando sale, la luz del día dura un poco más de lo que lo haría sin la refracción. Así, debido a que el sol se pone perpendicular al horizonte en el ecuador, podemos contemplarlo por lo menos durante 2,3 minutos más gracias al efecto de refracción. Cerca de los polos el tiempo adicional es mucho más largo porque el sol se pone formando un gran ángulo con la vertical y se pierde por el horizonte más lentamente.

La refracción es fuente de problemas tanto en el método de Gerver como en el de Rawlins. Un rayo de sol que parte del horizonte no viaja en línea recta al observador sino más bien en un círculo que tiene un radio seis veces el de la tierra (un análisis interesante de este efecto aparece en un trabajo clásico de Simon Newcomb, *A Compendium of Spherical Astronomy,* que fue publicado por primera vez en 1906, y reimpreso ahora por Dover).

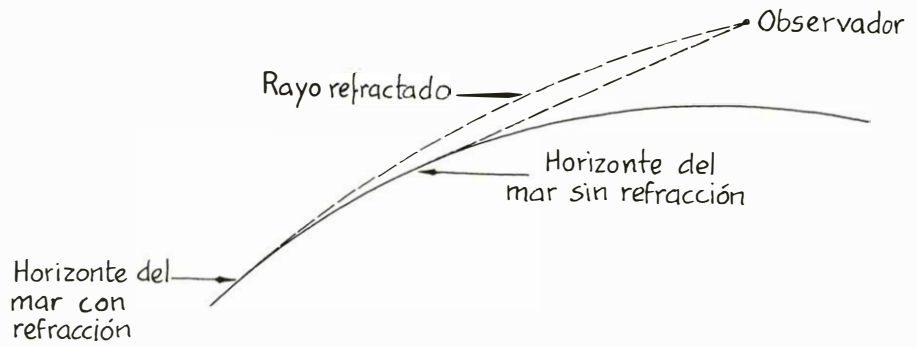
Los efectos de la refracción en los cálculos de Gerver son opuestos a los de Rawlins. En el método de Gerver, la depresión aparente del horizonte se contrae, y, por tanto, disminuye la longitud *a*. Puesto que se necesita esta longitud para varios de los cálculos de proporcionalidad hechos para hallar el radio de la tierra, el error persiste y se llega a deducir un radio que es alrededor del 20 por ciento mayor en virtud de la refracción. En la técnica de Rawlins, la distancia al horizonte del océano aumenta incrementando el ángulo que la tierra debe girar para que se produzca la segunda puesta de sol. Así pues, la refracción aumenta el tiempo entre las puestas de sol y hace disminuir el radio terrestre calculado en alrededor del mismo 20 por ciento.

No se puede contar con el efecto de refracción de una forma segura porque depende de la temperatura y presión de las capas de aire a través de las cuales viajan los rayos de luz. Aquellas magnitudes cambian frecuentemente, no sólo de un punto a otro de la atmósfera, sino también en un mismo sitio. Como una corrección aproximada al efecto de la refracción, Rawlins multiplica su ecuación básica del radio por 1,2. Esta corrección se basa en la idea de que los efectos de la refracción rebajan el radio calculado en aproximadamente un factor 1,2. La corrección reduce de un modo acertado el tiempo medido entre ambas puestas de sol (más exactamente el cuadrado del tiempo) al valor que se obtendría si no hubiera refracción atmosférica.

Sin los refinados procedimientos de Gerver y Rawlins, la única manera de calcular la variación diaria de la refracción es repetir los experimentos muchos días y sacar la media de los radios calcu-



Geometría del método de observar los ocasos de Dennis Rawlins



Papel de la refracción

lados. El factor corrector de 1,2 se verá muy poco modificado. Si la atmósfera está muy estratificada y sus capas tienen un índice de refracción muy diferente, el sol poniente parecerá estar también dividido en capas. El factor corrector de 1,2 será probablemente poco exacto y la medida del radio de la tierra se alejará de la cifra obtenida.

Rawlins hizo otras dos modificaciones a su ecuación básica, relacionadas ambas con el hecho de que en muchos sitios el sol no se pone perpendicularmente al horizonte. Estando en el ecuador, la puesta vertical ideal se puede ver sólo en los equinoccios de primavera y de otoño. En cualquier otra latitud y fecha, las puestas de sol son más lentas porque el sol se oculta formando un ángulo no nulo con la vertical. Rawlins corrige este efecto mediante dos factores que llama *A* y *B*; el primero tiene que ver con la fecha y el segundo con la latitud. *A* es el cuadrado del coseno de la declinación del sol el día del experimento. *B* es el cuadrado del seno de la latitud (con independencia de que sea norte o sur).

El recorrido aparente del sol por el firmamento a lo largo del año determina un plano llamado plano de la eclíptica, que está inclinado 23,44 grados con respecto al plano del ecuador. El sol cruza el plano ecuatorial dos veces al año, en el equinoccio de primavera que tiene lugar sobre el 20 de marzo, y en el otoño, hacia el 23 de septiembre (el momento preciso del equinoccio retrocede cada cuatro años excepto cuando cae en año bisiesto). La declinación del sol es la distancia angular hacia el norte o sur del plano ecuatorial de la tierra. Por ejemplo, en los equinoccios la declinación es cero, en el solsticio de invierno (21 de diciembre) es de unos 23,4 grados hacia el sur y en el solsticio de verano (21 de junio) es de unos 23,4 grados hacia el norte. Se pueden encontrar tablas precisas de la declinación del sol en los anuarios publicados por las principales sociedades astronómicas e institutos relacionados. El lector interesado puede hallar su latitud aproximada en un atlas; con esta latitud y la fecha de las observaciones puede utilizar ya los factores asociados *A* y *B* de la ilustración de esta página. Para usar estos factores correctivos hay que sustraer *B* de *A* y dividir el resultado por la ecuación básica de Rawlins.

Como ejemplo de la fórmula completa, Rawlins proporciona los datos de una de sus observaciones. El 5 de abril de 1978, cronometró una doble puesta de sol en Cove Park en La Jolla, California. La latitud del parque es 32 grados y 51 minutos norte. Rawlins observó la primera puesta de sol a las 6 horas 11 minutos y 55 segundos de la tarde, siendo la altura, desde nivel del mar a sus ojos, de unos 1,72 metros. Después de subir a una escalera hizo su segunda observación a las 6 horas 12 minutos y 15 segundos de la tarde, a una altura de 8,95 metros sobre el nivel del mar. El tiempo registrado por su cronómetro desde los últimos rayos de la primera puesta y los de la segunda fue de 19,6 segundos.

Rawlins calculó luego la altura añadida al horizonte del océano por las olas distantes en 0,6 metros. Sustrajo esta cifra de las dos alturas de observación, que pasaron a ser 1,12 y 8,35 metros. Para obtener la diferencia de altura efectiva necesaria para el cálculo, extrajo la raíz cuadrada de ambas cifras, halló la diferencia entre ellas y elevó al cuadrado el resultado, obteniendo un valor final de 3,55 metros.

Elevando al cuadrado el tiempo, dividiendo el resultado por la constante de proporcionalidad de $3{,}78 \times 10^5$ y multiplicando por la diferencia de altura efectiva de 3,35 metros, obtuvo el resultado de 3300 kilómetros como medida del radio terrestre, cifra que resultaba ser un 48 por ciento demasiado baja, pero los factores relacionados con la fecha, la latitud y la refracción no se habían tenido aún en cuenta.

Interpolando a partir de las tablas, Rawlins descubrió que el día 5 de abril tenía un factor *A* de 0,988. El factor *B* para su latitud era aproximadamente 0,295. *A* menos *B* era 0,693. Dividió esta cifra por el resultado anterior y obtuvo un radio de 4800 kilómetros, un resultado aún bajo en un 25 por ciento. Para utilizar el dato de la refracción multiplicó este resultado por 1,2 y así obtuvo el valor final de su radio: 5700 kilómetros. Esta cifra es inferior a la oficial en un 10 por ciento.

Si el lector vive cerca de un océano o de un lago grande, quizá quiera repetir el experimento de Gerver o el de Rawlins, recogiendo suficientes datos que le permitan encontrar un valor medio para el radio de la tierra. Dado que la refracción atmosférica afecta a ambos experimentos en direcciones opuestas, si se realizan ambos y se saca la media de los resultados, se pueden casi eliminar los efectos de la refracción. A mí me resulta impresionante que se pueda llegar a una cifra muy cercana al radio real de la tierra con medidas aproximadas y sin más equipo que una regla o un reloj y aún es más impresionante que se pueda llegar a resultados que difieran sólo entre un 10 y un 20 por ciento de las medidas oficiales.

Hace mucho tiempo que el hombre se dio cuenta de que la tierra era redonda debido a ciertas pistas: las estrellas tenían posiciones muy diferentes vistas desde lugares separados hacia el norte o hacia el sur, los barcos desaparecían en

Día del año (mes/día)				A	Latitud	B
3/20	9/22	9/22	3/20	1	0°	0
3/27	9/15	9/30	3/13	.9975	5°	.0076
4/4	9/7	10/7	3/6	.99	10°	.030
4/10	9/1	10/14	2/27	.98	15°	.067
4/15	8/27	10/19	2/22	.97	20°	.117
4/20	8/22	10/23	2/18	.96	25°	.179
4/24	8/18	10/27	2/14	.95	30°	.250
4/28	8/14	10/31	2/10	.94	35°	.329
5/1	8/10	11/3	2/6	.93	40°	.413
5/5	8/7	11/7	2/3	.92	45°	.500
5/9	8/3	11/11	1/30	.91	50°	.587
5/13	7/30	11/14	1/27	.90	55°	.671
5/17	7/26	11/18	1/23	.89	60°	.750
5/21	7/22	11/22	1/19	.88	65°	.821
5/26	7/17	11/27	1/14	.87	70°	.883
5/31	7/12	12/2	1/9	.86	75°	.933
6/7	7/5	12/8	1/3	.85	80°	.970
6/12	6/29	12/13	12/29	.845	85°	.9924
6/21	6/21	12/21	12/21	.8417		

Los factores **A** *y* **B** *usados por Rawlins*

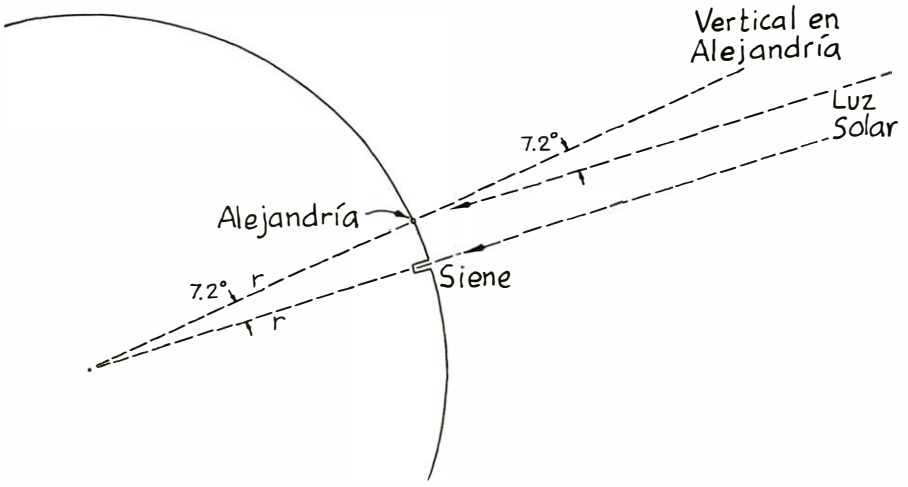
el horizonte, la sombra de la tierra en la luna durante un eclipse lunar era redonda. Sin embargo, para muchos hombres fue difícil aceptar la idea de una tierra redonda.

Narra la leyenda que un sabio griego, Eratóstenes, que trabajaba en Alejandría, realizó las primeras mediciones del tamaño de la tierra hace unos 2200 años. Para ello utilizó un método muy simple (casi rudo), pero sorprendentemente obtuvo buenos resultados. En Siene (ahora Asuan) advirtió (o le hicieron caer en la cuenta) que por la tarde, en el solsticio de verano, los rayos solares entraban en un pozo verticalmente. Esto le llevó a pensar que él podría calcular la circunferencia de la tierra si supiera el ángulo (desde la vertical) de los rayos de sol al mediodía en la misma fecha en Alejandría, que estaba al norte de Siene y situada casi en el mismo meridiano.

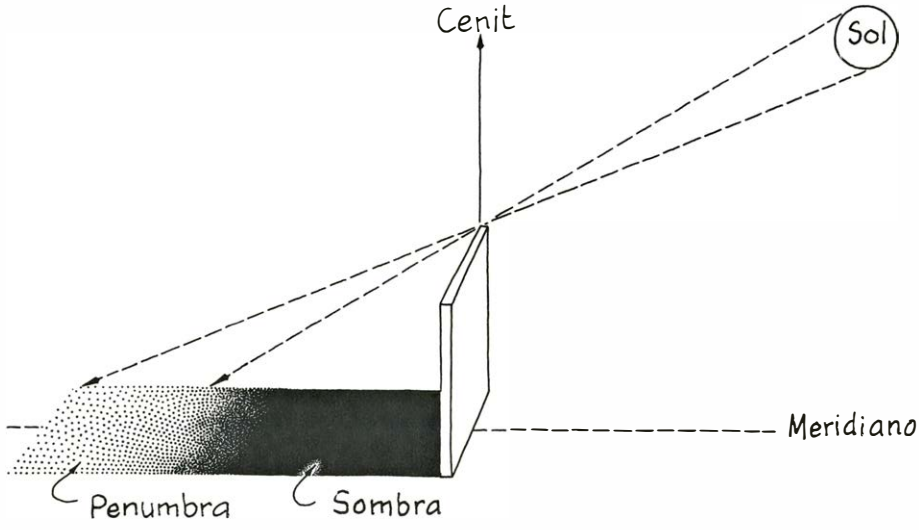
Siempre según la leyenda, las mediciones de Eratóstenes en Alejandría demostraron que los rayos se desviaban de la vertical en una cincuentava parte del círculo (7,2 grados). Dado que los rayos de Alejandría eran paralelos a los de Siene (debió observar que la distancia al sol sobrepasaba mucho al radio de la tierra), la diferencia de ángulo tenía que ser el resultado de la curvatura de la tierra. El arco entre las dos ciudades a lo largo de la superficie terrestre ocupa un ángulo de 7,2 grados con respecto al centro de la tierra.

Así pues, para hallar la circunferencia de la tierra lo único que tenía que hacer Eratóstenes era deducir la relación de este ángulo y 360 grados e igualarla con la razón entre la longitud del arco que separa ambas ciudades y la circunferencia de la tierra. Sin embargo, no fue fácil encontrar la distancia entre una y otra ciudad. Dando pruebas de un gran ingenio, Eratóstenes midió la distancia tomando como base el tiempo que tardaban los camellos en ir de una ciudad a otra, que eran 50 días aproximadamente. Sabiendo qué recorrido hacía un camello en un día, pudo calibrar la distancia entre Alejandría y Siene y así calcular la circunferencia de la tierra. Su resultado (en medidas modernas) fue de 46.250 kilómetros, cifra que excede en un 16 por ciento el valor real.

Siguiendo la historia, la siguiente medición de la circunferencia de la tierra ocurrió en el año 85 antes de Cristo, por Poseidón de Apamea, quien usó la distancia entre Rodas y Alejandría de la misma forma que Eratóstenes lo hiciera con Alejandría y Siene. El medio empleado por Poseidón para medir la distancia entre ambas ciudades fue un barco de



Geometría del método atribuido a Eratóstenes



Método del gnomon para determinar la orientación de los rayos solares

línea regular que las unía. Poseidón midió el ángulo observando la estrella Canopus; cuando estaba en el horizonte de Rodas, se hallaba 7,5 grados por encima del horizonte de Alejandría. Se dice que Poseidón llegó a calcular la circunferencia de la tierra haciendo el mismo tipo de cálculos que Eratóstenes. Los cálculos modernos afirman que sus mediciones eran erróneas en una sexta parte o alrededor del 17 por ciento.

Posteriormente, Abdullah al-Hamun realizó otra medición, y sus resultados se alejaban de la cifra real en sólo un 3,6 por ciento. Dispuso de datos astronómicos muy exactos para hallar el ángulo que necesitaba e incluso llegó a medir la distancia de su arco colocando señales en los extremos del mismo.

Las técnicas modernas son, por supuesto, más exactas. Se sirven de satélites artificiales, rayos láser y reflectores en la luna, con lo cual el tamaño de la tierra es perfectamente conocido así como el hecho de que no es totalmente esférica. Han transcurrido muchos siglos desde la época de los antiguos griegos que creían que la tierra era plana y que estaba sostenida por cuatro enormes elefantes que a su vez se sostenían sobre una inmensa tortuga. A nosotros no nos preocupa ya el problema filosófico de sobre qué se asienta la tortuga.

A lo mejor el lector quiere medir el radio de la tierra con la técnica atribuida a Eratóstenes. En este caso es aconsejable elegir dos ciudades cuyos respectivos meridianos estén próximos, aunque esta exigencia no es esencial. Las ciudades deben estar referenciadas por una medida que resulte práctica. (Esta podrá encontrarse en un mapa o en una tabla de distancias.)

Para medir la orientación de los rayos solares en ambas ciudades hace falta que dos amigos, uno en cada ciudad, lleven a cabo el experimento el mismo día. Ambos deberán levantar un gnomon, un poste rectangular vertical con una cara perpendicular al meridiano. Cuando el sol alcance su cenit, se mide la longitud de la sombra producida por

el gnomon (será la más corta entonces). La tangente de la distancia angular del sol desde el cenit es igual a la longitud de la sombra dividida por la altura del gnomon. Aunque se podría calcular entonces el ángulo con una tabla de funciones trigonométricas, mi sugerencia es hacerlo con una calculadora de bolsillo para evitar el problema de interpolación entre los valores de la tabla. El ángulo entre la vertical y los rayos solares es, por supuesto, el mismo.

Una vez tomadas las medidas, hay que restarles los ángulos obtenidos por ambos observadores. Después, siguiendo el procedimiento de Eratóstenes se divide la diferencia angular por 360 grados y se multiplica por la longitud del arco entre las dos ciudades. El resultado es la circunferencia de la tierra.

El inconveniente de este método es que el extremo más alejado de la sombra no es muy nítido, ya que va pasando desde la total brillantez a través de una zona de iluminación parcial (la penumbra) hacia un área de máxima obscuridad (la sombra). La penumbra está iluminada parcialmente, porque la plancha bloquea los rayos que se originan desde la parte más baja del sol pero no bloquea los de la parte superior. Dentro de la sombra todos los rayos directos del sol quedan bloqueados por la plancha.

Para hallar la distancia angular entre el cenit y el centro del sol se calcula la sombra hasta el punto central de la penumbra. Esta medida es difícil de realizar con precisión e introduce inevitablemente un error que puede llegar a ser de un cuarto de grado si se usa cualquier borde de la penumbra en la determinación del ángulo de los rayos de sol. La penumbra es 0,5 grados de ancho porque el sol subtiende un ángulo de 0,5 grados en el campo de visión del observador. El error inherente a la localización del centro de la penumbra hace del gnomon un instrumento impreciso para calcular el tamaño de la tierra.

El incremento puede salvarse sustituyendo el gnomon por otro aparato. Verbigracia: montando un perno horizontal en el centro de un círculo graduado colocado de forma que su plano sea vertical y esté alineado perpendicularmente al meridiano. La sombra producida por el perno tendrá zonas de penumbra a lo largo de la longitud de la sombra. Por ser simétricas en los dos lados de la sombra, es fácil encontrar el centro de la sombra y leer su posición en el círculo graduado. Cuando el círculo está bien orientado, la lectura resultante será la distancia angular del sol desde el cenit y, por tanto, el ángulo de los rayos incidentes sin ningún error sistemático introducido por las zonas de penumbra.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MONOXIDO DE CARBONO EN LA GALAXIA

THE MILKY WAY. Bart J. Bok y Priscilla F. Bok. Harvard University Press, 1974.

MAN DISCOVERS THE GALAXIES. Richard Berendzen. Richard Hart y Daniel Seeley. Science History Publications, 1976.

THE LARGE-SCALE CHARACTERISTICS OF THE GALAXY. Proceedings of the International Astronomical Union. Symposium n.º 84, dirigido por W. B. Burton. D. Reidel Publishing Company. 1979.

EL SPIN DEL PROTON

ELASTIC PROTON–PROTON SCATTERING AT 90° AND STRUCTURE WITHIN THE PROTON. C. W. Akerlof, R. H. Hieber, A. D. Krisch, K. W. Edwards, L. G. Ratner y K. Ruddick en *Physical Review,* vol. 159, n.º 5, págs. 1138-1149; julio, 1967.

ACCELERATION OF POLARIZED PROTONS TO 8.5 GeV/c. T. Khoe, R. L. Kustom, R. L. Martin, E. F. Parker, C. W. Potts, L. G. Ratner, R. E. Timm, A. D. Krisch, J. B. Roberts y J. R. O'Fallon en *Particle Accelerators,* vol. 6, n.º 4, págs. 213-236; 1975.

SPIN-SPIN INTERACTIONS IN HIGH $P_\perp^2$ ELASTIC *P-P* SCATTERING. J. R. O'Fallon, L. G. Ratner, P. F. Schultz, K. Abe, R. C. Fernow, A. D. Krisch, T. A. Mulera, A. J. Salthouse, B. Sandler, K. M. Terwilliger, D. G. Crabb y P. H. Hansen en *Physical Review Letters,* vol. 39, n.º 12, págs. 733-736; 19 de septiembre de 1977.

LA CONQUISTA DE EUROPA OCCIDENTAL POR LAS LENGUAS INDOEUROPEAS

INDO-EUROPEAN AND INDO-EUROPEANS. PAPERS PRESENTED TO THE THIRD INDO-EUROPEAN CONFERENCE AT THE UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA, dirigido por G. Cardona, H. M. Hoenigswald y A. Senn, Philadelphia 1970.

SPRACHEN UND INSCHRIFTEN. A. Tovar. Amsterdam, 1973.

FLEXION UND WORTBILDUNG, dirigido por H. Rix, Akten der 5. Fachtagung der Indogermanischen Gesellschaft, Wiesbaden, 1975.

KRAHES ALTEUROPÄISCHE HYDRONYMIK UND DIE WESTINDOGERMANISCHEN SPRACHEN. A. Tovar en *Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Philos.–hist. Klasse,* 1977.

INDOGERMANISCH UND KELTISCH, KOLLOQUIUM DER INDOGERMANISCHEN GESELLSCHAFT IN BONN, dirigido por K. H. Schmidt, Wiesbaden, 1977.

LA BASE MOLECULAR DEL MOVIMIENTO CELULAR

CELL MOTILITY. Dirigido por R. Goldman, T. Pollard y J. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Conferences on Cell Proliferation, 1976.

ACTIN, α-ACTININ, AND TROMPOMYOSIN INTERACTION IN THE STRUCTURAL ORGANIZATION OF ACTIN FILAMENTS IN NONMUSCLE CELLS. Elias Lazarides en *The Journal of Cell Biology,* vol. 68, n.º 2, págs. 202-219; 1976.

FLUORESCENT ANTIBODY LOCALIZATION OF MYOSIN IN THE CITOPLASM, CLEAVAGE FURROW, AND MITOTIC SPINDLE OF HUMAN CELLS. Keigi Fujiwara y Thomas D. Pollard en *The Journal of Cell Biology,* vol. 71, n.º 3, págs. 848-875; diciembre, 1976.

UTILIZACION DEL LASER EN QUIMICA

INFRARED LASER CATALYZED CHEMICAL REACTIONS. A. M. Ronn en *Spectroscopy Letters,* vol. 8, n.º 5, págs. 303-328; 1975.

CHEMICAL AND BIOCHEMICAL APPLICATIONS OF LASERS: vol. 3. Dirigido por C. B. Moore. Academic Press, 1977.

SELECTIVE DISSOCIATION OF POLYATOMIC MOLECULES BY INTENSE INFRARED LASER FIELDS. Rafael V. Ambartzumian y Vladilen S. Letokhov en *Accounts of Chemical Research,* vol. 10, n.º 2, págs. 61-67; febrero, 1977.

LASER AND CHEMISTRY. Sol Kimel y Shammai Speiser en *Chemical Reviews,* vol. 77, n.º 4, págs. 437-472; agosto, 1977.

INFRARED INDUCED UNIMOLECULAR REACTIONS. N. Bloembergen y E. Yablonovitch en *Physics Today,* vol. 31, n.º 5, págs. 23-30; mayo, 1978.

UN SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL CEREBRO EN LOS MAMIFEROS

INFLUENCE OF THE CAROTID RETE ON BRAIN TEMPERATURE IN CATS EXPOSED TO HOT ENVIRONMENTS. M. A. Baker en *Journal of Physiology,* vol. 220, n.º 3, págs. 711-728; febrero, 1972.

RAPID BRAIN COOLING IN EXERCISING DOGS. M. A. Baker y L. W. Chapman en *Science,* vol. 195, n.º 4280, págs. 781-783; 25 de febrero de 1977.

PROBLEMAS INTRINSECAMENTE DIFICILES

THE DESIGN AND ANALYSIS OF COMPUTER ALGORITHMS. Alfred V. Aho, John E. Hopcroft y Jeffrey D. Ullman. Addison-Wesley Publishing Co., 1974.

WEAK MONADIC SECOND ORDER THEORY OF SUCCESSOR IS NOT ELEMENTARY-RECURSIVE. Albert R. Meyer en *Lecture Notes in Mathematics: No. 453,* dirigido por A. Dold y B. Eckmann. Springer-Verlag, 1975.

AN INTRODUCTION TO THE GENERAL THEORY OF ALGORITHMS. Michael Machtey y Paul Young. Elsevier North-Holland Publishing Co., 1978.

EL COMETA DE HALLEY PINTADO POR GIOTTO

THE NATURE OF COMETS. Nikolaus B. Richter. Methuen & Co Ltd., 1963.

THE COMPLETE PAINTINGS OF GIOTTO. Edi Baccheschi. Weidenfeld & Nicolson, 1969.

GIOTTO: THE ARENA CHAPEL FRESCOES. Dirigido por James H. Stubblebine. W. W. Norton & Co., Inc., 1969.

JUEGOS MATEMATICOS

MAGIC AND PARAPHYSICS. Martin Gardner en *Technology Review,* vol. 78, n.º 7, págs. 42-51; junio, 1976.

GELLER, GULLS, AND NITINOL. Martin Gardner en *The Humanist,* vol. 37, n.º 3, págs. 25-32; mayo/junio; 1977.

TALLER Y LABORATORIO

A COMPENDIUM OF SPHERICAL ASTRONOMY. Simon Newcomb. Dover Publications, Inc., 1960.

DOUBLING YOUR SUNSETS, OR HOW ANYONE CAN MEASURE THE EARTH'S SIZE WITH A WRISTWATCH AND METERSTICK. Dennis Rawlins en *American Journal of Physics,* vol. 47, n.º 2, págs. 126-128; febrero, 1979.

Taller y laboratorio

Experimentos con el método de Edwin Land para obtener color a partir del blanco y negro

Jearl Walker

En 1950 Edwin Land llevó a cabo una serie de experimentos simples con idea de investigar los estímulos responsables de la visión de los colores. En uno de ellos fotografió dos veces, en blanco y negro, una misma escena. Al hacer la primera fotografía colocó delante del objetivo un filtro rojo y al hacer la segunda un filtro verde. De los negativos obtenidos sacó dos diapositivas en blanco y negro, que proyectó con dos proyectores de forma simultánea sobre una misma pantalla, colocando delante de la diapositiva realizada a través del filtro rojo otro filtro del mismo color y no poniendo nada, es decir, proyectando sin filtro la otra diapositiva, la obtenida a través del filtro verde.

Lo que intuitivamente se podría esperar de tal proyección conjunta era una reproducción de la escena original en varios tonos de blanco, rosa y rojo, debido al filtro colocado en uno de los proyectores. Pero, sorprendentemente, Land vio sobre la pantalla una reproducción de la escena original con la mayoría de los colores que ésta tenía en la realidad. Aunque los colores aparecían un poco débiles, estaban allí a pesar de que lo que Land había proyectado eran dos diapositivas en blanco y negro.

Durante más de 20 años, Land, John L. McCann y sus colaboradores se han dedicado a descifrar cómo el sistema de visión humano (el ojo y la corteza visual) percibe y es capaz de diferenciar la sutil diferencia entre las diversas tonalidades de los colores. Land describió sus primeros trabajos en *Scientific American,* en mayo de 1959. Los experimentos realizados en los últimos veinte años le han permitido profundizar en el conocimiento de los procesos de la visión en color. Tales avances los explica Land en su último artículo publicado [véase "La teoría retinex de la visión del color", por Edwin H. Land, INVESTIGACION Y CIENCIA, febrero 1978].

Robert Szabo, alumno de la Universidad estatal de Cleveland, repitió no hace mucho los experimentos de Land: sacó diapositivas en blanco y negro a través de filtros de colores y proyectó luego simultáneamente las diapositivas sobre una pantalla, si bien utilizó un solo filtro. Aunque los resultados no dieron unos colores tan vivos como al parecer lo fueron los obtenidos en los primeros trabajos de Land, sí demostró cuán fácil resultaba para un fotógrafo aficionado obtener los efectos que conseguía Land.

Land fotografiaba unas veces naturaleza muerta, frutas por ejemplo, y objetos similares, y otras fotografiaba un papel coloreado con una complicada distribución de colores que él llamaba un "Mondrian". Szabo por su parte eligió como modelo un nuevo cartel, el ColorChecker, producido recientemente por Macbeth, una filial de la Kollmorgen Corporation. El cartel se está convirtiendo en una referencia típica en todas las ramas de la fotografía en color, gracias a la distribución espectral de sus cuadrados cromáticos. Cada cuadrado tiene un color casi idéntico al color natural asequible al fotógrafo. Así, un cuadrado tiene un azul muy similar al típico azul del cielo, pero no sólo similar en el tono de azul dominante sino también a lo largo de todo el espectro visible.

Una ventaja de fotografiar referencias standard es que uno puede comparar en cualquier momento el modelo con las imágenes proyectadas. Un modelo con una naturaleza muerta no tiene tal constancia cromática , sobre todo si en el modelo hay frutas. Otra ventaja es que los resultados que uno obtenga pueden transmitirse a otros con tal de que empleen el mismo modelo. La disposición de colores Mondrian no gozaba de esa flexibilidad.

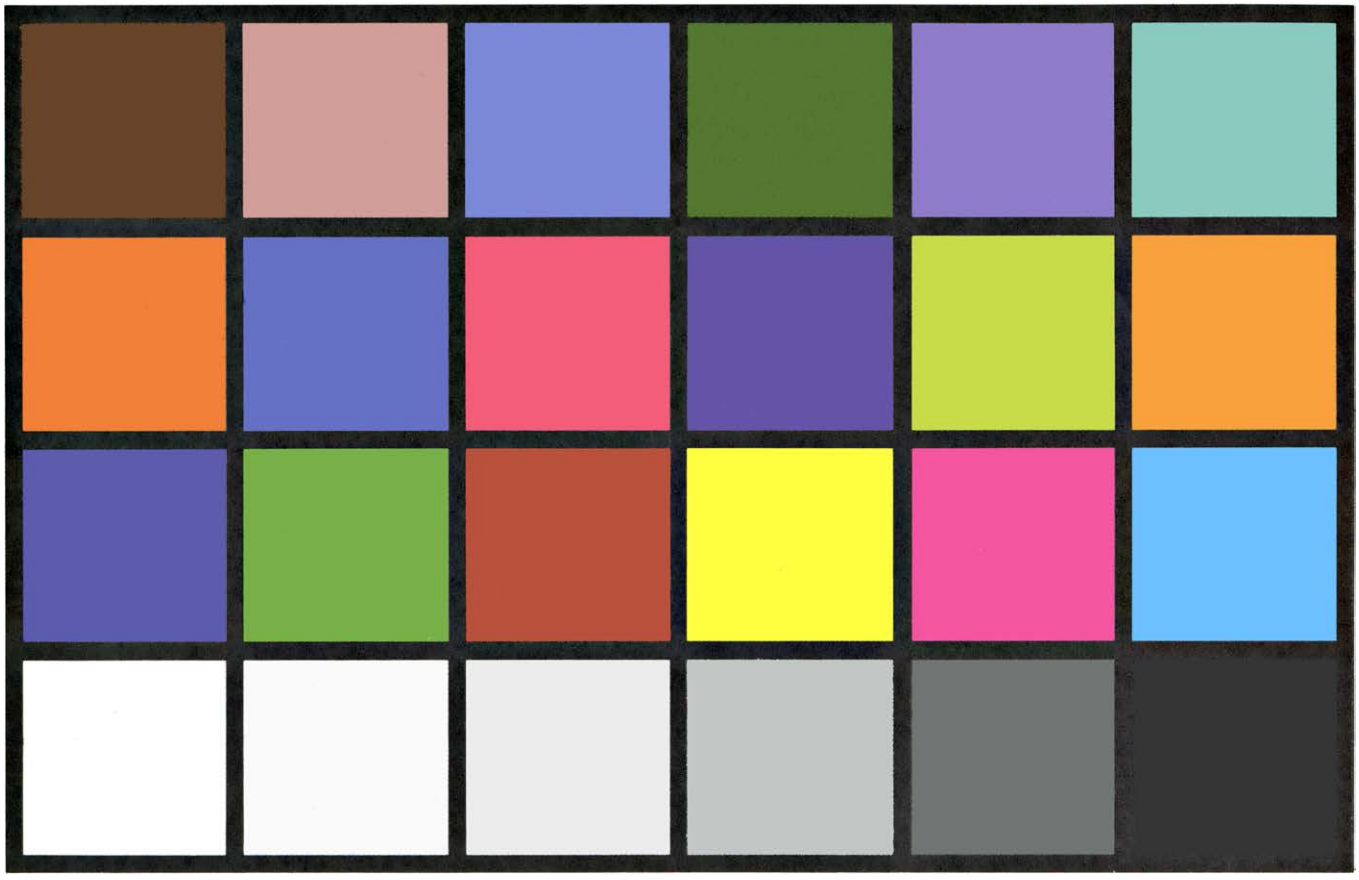
El ColorChecker tiene también una desventaja: la influencia de los cuadrados circundantes sobre cada uno de los cuadrados de la imagen proyectada puede afectar a los resultados del experimento. Con la disposición aleatoria de las pequeñas secciones de Mondrian, cada una de ellas formada por varios colores y colocada de un modo distinto, se anula la influencia de los colores circundantes.

Para fotografiar la tabla de los colores, Szabo montó su cámara en un soporte rígido colocándole un cable disparador con el fin de evitar que se moviera en la acción de dispararla. Iluminó la tabla cartel con dos reflectores de tungsteno orientados de manera que ambos formaran un ángulo de 45 grados con el panel donde estaba colocada la tabla. En vez de filtros de colores de alta calidad, Szabo empleó otros algo más baratos, pero suficientemente buenos. Los filtros medían 12,5 x 20 centímetros, un tamaño adecuado para la cámara fotográfica y para el proyector.

El mejor tipo de película a emplear quizá sea el de diapositivas en blanco y negro de Polaroid, ya que dichas películas son sensibles de un modo bastante uniforme en las distintas regiones del espectro visible. Szabo optó por las películas Pan-X para blanco y negro que son relativamente baratas. Con un equipo Kodak para revelar directamente al positivo, Szabo reveló y montó él mismo las diapositivas. Primero fotografiaba la tabla de colores ajustando la cámara para obtener la exposición (apertura de diafragma y velocidad de exposición) adecuada a las condiciones de iluminación que tenía, y luego realizaba otras tomas modificando dichos parámetros. Con el fin de comparar y ver posteriormente la influencia de los mismos, anotaba con sumo cuidado los datos de las condiciones en que había tomado cada foto. La proyección sobre una pantalla de tipo convencional la efectuaba con dos proyectores. Tanto la luz empleada en el proyector como la usada para realizar las fotos han de ser blancas y de buena calidad, de forma que ambas presenten distribuciones cromáticas muy similares.

A la diapositiva hecha con el filtro que básicamente deja pasar las longitudes de onda más largas se le llama registro largo, mientras que la otra, hecha con el filtro que deja pasar sobre todo las longitudes de ondas más cortas, recibe el nombre de registro corto. Siguiendo los experimentos de Land, Szabo hizo un gran número de ensayos empleando una amplia gama de filtros y de métodos de proyección.

El tipo más sencillo de ensayo era el que realizaba con un registro largo y uno corto; cuando empleaba un filtro en la proyección éste era el mismo filtro con el que había hecho el registro largo y lo situaba en el proyector que iba a proyectar dicha diapositiva. En uno de estos ensayos, hizo el registro largo con



La tabla ColorChecker fotografiada por Robert Szabo en sus experimentos

Marrón oscuro	Cuero oscuro	Azul celeste	Verde hoja	Lila	Verde azulado
Naranja	Azul púrpura	Rosa	Púrpura	Amarillo verdoso	Amarillo naranja
Azul	Verde	Rojo	Amarillo	Magenta	Cian
Blanco (0,05)†	Neutro 8* (0,23)†	Neutro 6.5* (0,44)†	Neutro 5* (0,70)†	Neutro (3,5)* (1,05)†	Negro (1,50)†

* Notación cromática † Densidad óptica

Identificación de los colores en la tabla

un filtro Edmund 821, que transmite principalmente la luz roja. El registro corto lo hizo con un filtro 856, que deja pasar el azul. Szabo había conseguido dos diapositivas en blanco y negro, hechas al fotografiar el mismo objeto dos veces, empleando sendos filtros que transmitían en extremos opuestos del espectro visible. Las diapositivas no mostraban, en apariencia, ninguna indicación sobre los colores y, caso de que llevaran información cromática de algún tipo, era de esperar que no incluyese ni el verde ni el amarillo, ya que ninguno de los dos filtros transmite bien las longitudes de onda correspondientes al verde y al amarillo.

Cuando Szabo proyectó las diapositivas, colocó frente a la diapositiva de registro largo el filtro 821. Al superponer las dos imágenes se encontró con una reproducción de la tabla ColorChecker que, además del rojo, mostraba algo de azul, amarillo y verde (pero no púrpura).

Las diapositivas que Szabo proyectó habían sido obtenidas fotografiando la tabla con el diafragma y la velocidad de exposición adecuados a la luz que suministraban los reflectores. Pero al proyectar las diapositivas realizadas con tiempos de exposición algo mayores, o algo menores, encontró por lo general que las características de color que obtenía eran similares a las anteriores, siempre que no se hubieran sobreexpuesto o infraexpuesto demasiado. Land había dicho que el nivel de intensidad de los proyectores no era crítico. Cualesquiera que fuesen los códigos de color, las diapositivas en blanco y negro mostraron que no dependían de forma crítica de la intensidad de la luz. Szabo y yo comprobamos esto, montando dos láminas polarizadoras de forma cruzada delante de uno de los proyectores. Modificando el ángulo que formaban los ejes de polarización de cada lámina, podíamos variar la intensidad de luz de la imagen proyectada en la pantalla. Vimos que dicha intensidad no influía críticamente en la proyección de los colores.

En otro ensayo, Szabo usó como registro corto una diapositiva hecha a través de un filtro 817 y como registro largo una ya hecha con el filtro 821. El filtro 817 deja pasar más el naranja que el 821. De nuevo, el filtro 821 se situó delante del proyector que proyectaba el registro largo. La superposición de imágenes dio una proyección muy débil y predominantemente rosada. Las características de transmisión de los filtros eran demasiado similares como para alcanzar todos los colores del espectro en la proyección. Si hubiésemos utilizado el mismo filtro al sacar las dos diapositivas, en la proyección posterior no hubiéramos conseguido más color que el del filtro situado delante de uno de los proyectores.

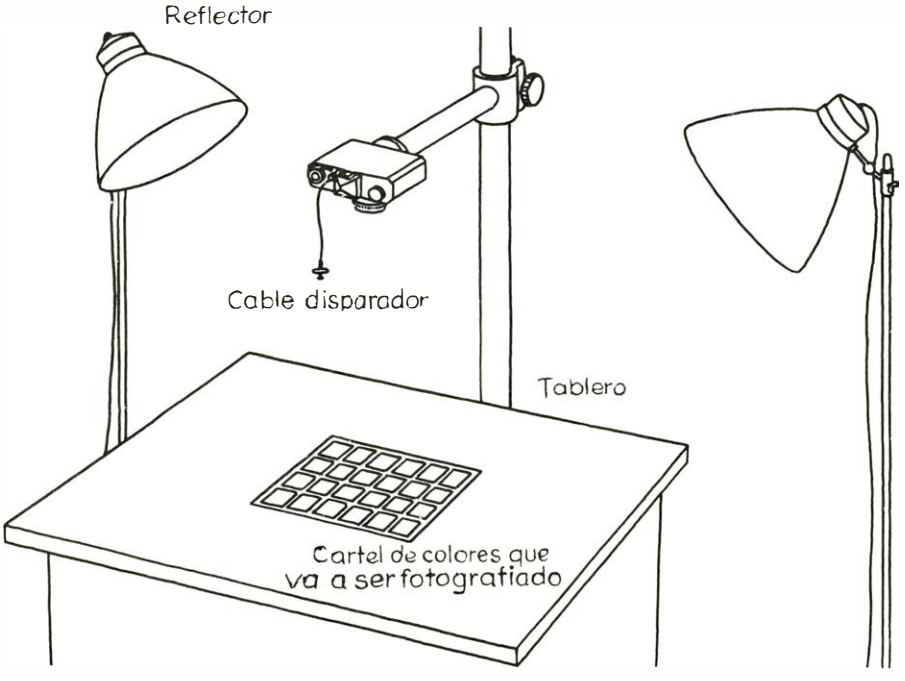
En el artículo publicado por Land en *Scientific American* se incluía un gráfico con el que se podía predecir qué colores no aparecerían en la proyección. Por ejemplo, Szabo proyectó sus diapositivas hechas a través de un filtro 821 (el cual presenta una transmisión máxima para las longitudes de ondas comprendidas entre 650 y 700 nanómetros) y de un filtro 856 (que tiene su máxima transmisión aproximadamente en 475 nanómetros). El punto correspondiente a dichos filtros en el gráfico está situado en una zona denominada "no púrpura". Szabo no veía el púrpura.

En la zona del gráfico a lo largo de la diagonal del mismo, el registro corto y el largo están demasiado próximos uno del otro como para producir colores en la imagen proyectada. Los filtros 817 y 821 empleados por Szabo corresponden a un punto próximo a la diagonal. Una zona sin delimitar debajo de la diagonal corresponde al caso de que el filtro empleado para hacer la diapositiva de registro largo se utilice luego para proyectar el registro corto, y viceversa. A Szabo y a mí nos divertía mantener el filtro del registro largo delante del proyector de registro largo y luego situarlo delante del proyector del registro corto para obtener la inversión de los colores.

Szabo ensayó la proyección de diapositivas anteponiendo al proyector del registro corto el filtro del registro corto y no poniendo ningún filtro delante del proyector de registro largo. No se lograron colores tan bien definidos. Por ejemplo, realizó fotografías usando filtros 858 (que transmite el verde) y 863 (que transmite más en la zona del azul). En la imagen proyectada se apreciaban marrones, azules y azules verdosos.

Szabo experimentó también con el incremento del número de filtros, es decir: usó dos o más filtros a la vez con el fin de estrechar la banda de longitud de ondas transmitida. En un ensayo superpuso los filtros 861, 863 y 866 para eliminar cualquier luz fuera del rango de 550 a 700 nanómetros, que corresponde al amarillo, rojo y algo del verde. Hizo la diapositiva correspondiente al registro largo con un filtro 821 y la proyectó con el mismo filtro situado delante de su proyector. No encontró el amarillo en la proyección, pero en cambio sí estaban los otros colores.

En una serie de experimentos, Szabo fotografió el registro largo a través de dos filtros (el 874 y el 877) superpuestos, para conseguir una banda estrecha de paso situada alrededor de los 500 nanómetros. El registro corto lo hizo a través de un filtro 866, el cual transmite mucho el azul, con un máximo de transmisión en los 450 nanómetros. Cuando situó los filtros utilizados para hacer el registro largo delante del proyector del registro largo, obtuvo azules y verdes. Por el contrario, si colocaba el filtro correspondiente al registro corto delante del registro largo, obtenía azules y un amarillo pálido (esto es, una inversión de colores, dado que delante del registro largo se había colocado el filtro "erró-



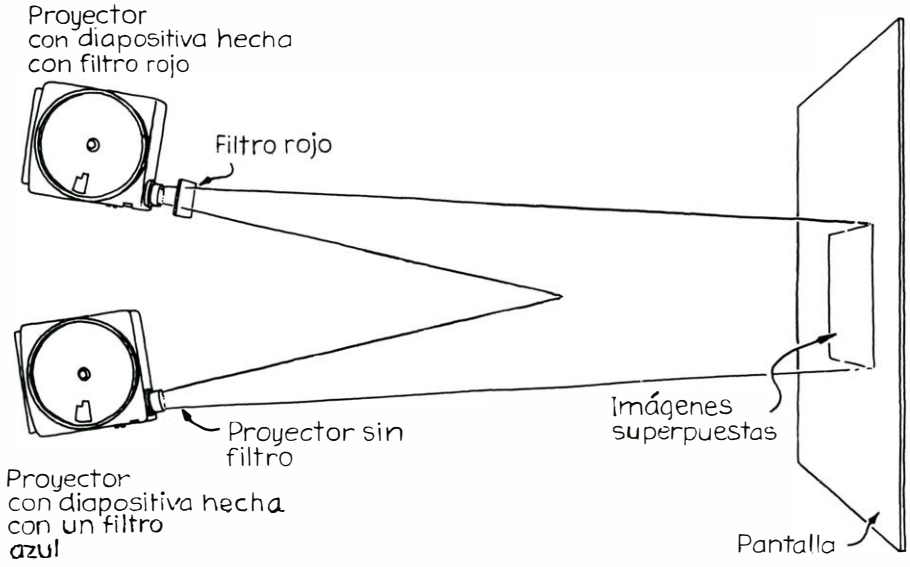
Montaje de Szabo para fotografiar la tabla de colores

neo"). Llevado por la curiosidad, juntó los filtros y colocó delante de la diapositiva, registro largo, otro filtro, el 807, que deja pasar un ancho de banda que va de los 525 a los 775 nanómetros. Aunque este filtro no era el adecuado para la proyección, algunos colores débiles se vieron en la pantalla.

Land exponía en el artículo mencionado que los colores salían aun cuando el registro corto se hubiera fotografiado sin filtro. Szabo combinó algunas diapositivas hechas sin filtro y proyectadas sin filtro con algunos de los registros largos anteriormente obtenidos. Al colocar frente al registro largo su correspondiente filtro, aparecieron en la pantalla colores débiles.

¿Por qué aparecen los colores cuando se proyectan a la vez sobre una pantalla diversas diapositivas? No se sabe aún la razón detallada de este fenómeno, aunque Land y sus colaboradores han avanzado bastante en el tema durante las dos últimas décadas. Al observar una escena con varios colores, éstos no se ven cada uno por una determinada zona sino que, de acuerdo con la teoría de los colores, en la retina humana hay tres pigmentos visuales que actúan como tres fotómetros independientes. Puesto que las curvas de absorción de los pigmentos tienen sus respectivos máximos a 440, 535 y 565 nanómetros, cada uno de los pigmentos es sensible en una determinada zona del espectro y entre los tres abarcan el espectro visible completo. Esta teoría mantiene que, cuando la energía que llega a la retina correspondiente a una longitud de onda de, por ejemplo, 565 nanómetros, es mayor que la de los otros dos máximos, el observador percibirá el área referida en un tono rojizo. Pero si la energía llega a 440 nanómetros, se percibirá de color azul.

Esta era la explicación dada en los libros de texto durante mucho tiempo, por lo menos en las explicaciones sucintas de la teoría del color. Land ha demostrado, sin embargo, que el color es independiente del flujo energético que llega al ojo, cualquiera que sea su longitud de onda. Así, a lo largo de un experimento provocó que la energía procedente de dos zonas distintas fuera la misma en los tres máximos de absorción. De acuerdo con la teoría del color, ambas zonas deberían verse del mismo color; ahora bien, como las dos zonas eran dos partes distintas del cartel llamado Mondrian, el observador vio una zona verde y otra roja. En consecuencia, los flujos energéticos por sí sólos no eran la fuente de la información que sobre los colores recibía y procesaba el observador.

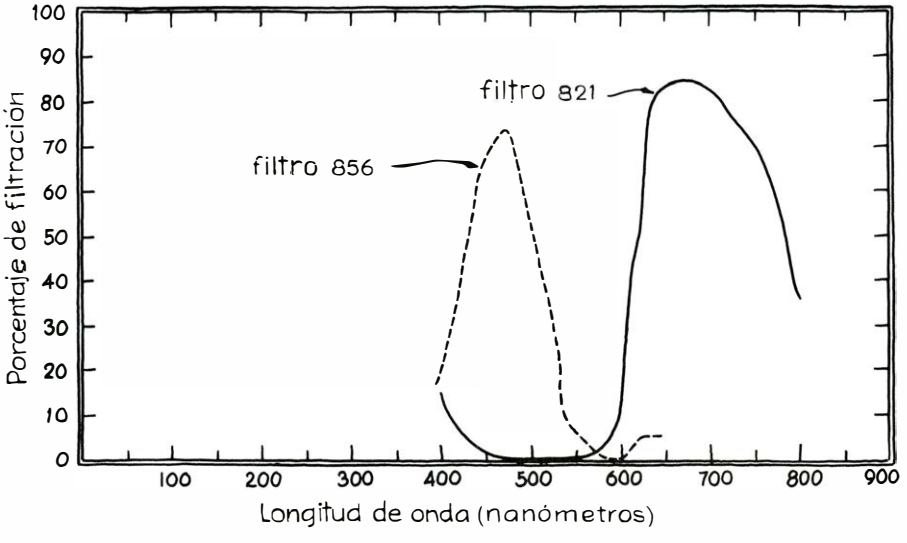


Montaje de Szabo para proyectar las diapositivas

Al mirar una escena de varios colores, su percepción resulta de dos procesos principales. Primero, el sistema visual compara las energías que le llegan en las tres ondas de máxima absorción (los receptores de longitudes de onda corta, media y larga) y asigna de acuerdo con ello una terna de números al flujo energético recibido de una determinada zona. El color no se ha determinado aún. Luego, el sistema visual compara esa zona con otras de la escena, asignando a cada una su propia terna de números. Por último, el sistema puede empezar a asignar color después de comparar las ternas de un número amplio de zonas. Por ejemplo, si una terna de una zona concreta tiene un valor alto en las longitudes de onda largas, algo más bajo en las longitudes de onda medias y aún más bajo en las cortas, se le asignará un color rojizo.

En el primero de los experimentos descritos, Szabo fotografió la tabla de colores a través de un filtro rojo; repitió luego con otro azul. El registro largo mostraba sombras blancas y negras de acuerdo con la reflexión de los distintos cuadros en las longitudes de onda rojas. Las zonas rojas aparecían claras en la filmina, las de color naranja algo menos claras y las azules relativamente oscuras. En el registro corto, la situación se invertía: las zonas azules aparecían claras, las naranjas más oscuras y las rojas eran las más oscuras de todas. Estas sombras relativas codifican la información de color que puede registrarse e interpretarse por un observador.

Cuando se proyectaba el registro largo con el mismo filtro rojo, la escena resultante era la misma (dentro de los límites de precisión de la película y la blancura de la lámpara de proyección) que la transmitida a través del filtro en la fotografía. Las zonas azules aparecían



Banda de paso a través de dos filtros

oscuras; las de color naranja, menos oscuras, y las rojas, claras. El color existente en las zonas claras era, por supuesto, sólo rosa o rojo. Cuando se apagó este proyector y se proyectó el registro corto sin filtro delante, la imagen mostraba una gama de zonas oscuras y claras reflejando lo que había sido transmitido a través del filtro azul. Esta vez la proyección sólo tenía sombras de gris oscuro, gris claro y blanco, pero registraban el grado de azul claro procedente de cada cuadro de la carta de colores.

Cuando se conectan ambos proyectores y se superponen las imágenes, ¿por qué se ven otros colores además del rosa y el rojo? Consideremos primero un cuadro que se vea rojo; en las imágenes superpuestas, éste es claro en las longitudes de onda largas, no tan claro en las longitudes de onda medianas y relativa-

Filtro de fotografía para registro corto	Filtro de fotografía para registro largo	Filtro de proyección	Comentarios
Verde 874	Rojo 821		Escala gris bien. Verdes pálidos. Rojos bien. Blanco bien
Verde 877	Rojo 821		A la inversa, cian más fuerte, mucho más brillante
Verde 871	Rojo 821		Lo mismo de antes
Verde 874, 877	Rojo 821		Escala gris bien; verdes desvaídos, blanco; azul verdoso pálido
Verde 871, 874	Rojo 821		Buena combinación de verdes
Verde 874, 877	Rojo 821, 823		No tan buena como la anterior
Verde 874, 877	Rojo 823		Mala
Verde 874, 877	Naranja 819		Tintes marrones, rojos malos
Verde 874, 877	Naranja 819		Naranjas brillantes
Azul 851	Naranja 819		Más oscuro
Naranja 819	Rojo 821		Buen cian, naranja bien
Naranja 817	Rojo 821		Pálidos
Naranja 818	Rojo 821	El mismo empleado para hacer la fotografía de registro largo	Aun más claros
Naranja 818	Rojo 821		Muy blancos
Azul 851	Rojo 821		Más color
Violeta 843	Rojo 821		Buen verde y rojo. Ni amarillo ni violeta.
Azul 856	Rojo 821		Más brillante que antes
Azul 858	Rojo 821		Muy buen color, un poco amarillo.
Azul 859	Rojo 821		Muy buen rojo y azul verdoso
Azul 863	Rojo 821		Más claro que antes
Azul 866	Rojo 821		No hay amarillo, los rojos y verdes buenos, no hay violeta, un poco de azul.
Azul 863, 866	Rojo 821		Tonos color carne y una escala de grises muy buena. Color magenta pálido, no amarillo
Azul 863, 866	Rojo 821		Normal; los colores oscuros malos
Azul 863, 866	Rojo 821		Buena escala de grises y tonos color carne
Amarillo, azul 807, 861	Rojo 821		Rojos y verdes azulados, no hay azul ni verde puros ni amarillo.
Azul 861, 863, 866	Rojo 821		Pálidos
Azul 858	Naranja 817		No hay amarillo, pero buen color
Azul 858	Amarillo 809	Naranja 817	Tintes anaranjados, escala gris de tono marrón
Azul 866	Verde 874, 877	Azul 866*	Lo mismo que arriba
Azul 863	Verde 874, 877	Azul 863*	No tan bueno, pero aparece el amarillo
Azul 866	Azul 863	Azul 866*	Mejor amarillo, la escala de grises aparece ligeramente azulada
Azul 859	Azul 863	Azul 863	Sin efecto
Azul 858	Azul 863	Azul 858*	Muy poco color
Azul 856	Rojo 821	Rojo 821	Marrón y azul verdoso, escala de grises con tono marrón
Azul 856	Rojo 821 (Exposición más larga)	Rojo 821	Muy bueno!
Azul 856	Rojo 823	Rojo 823	El color más saturado a medida que la diapositiva de registro largo es menos densa. Muy buena combinación además
Azul 856 (parada más larga)	Rojo 823	Rojo 823	Sin respuesta
Azul 856	Naranja 817	Naranja 817	Mejor que antes, pero pálido; escala de grises con tono marrón
Azul 866	Verde 874, 877	Amarillo 807	No hay rojo, sólo amarillo y naranja. Escala de grises con tono marrón, pálida
Azul 866	Verde 874, 877	Verde 874, 877	Colores pálidos
Azul 866	Verde 874, 877	Azul 866	Colores verdes
			Azules y amarillo pálido

* Se usa acoplador delante del registro corto

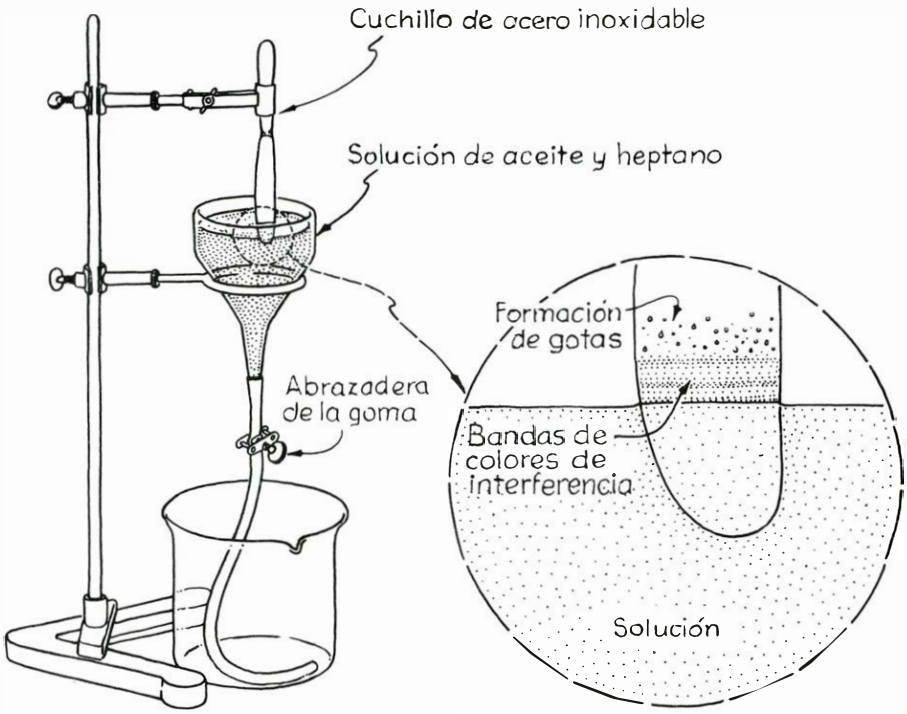
Observaciones de Szabo en una serie de experimentos

mente oscuro en las cortas, ¿por qué? Ello se explica porque el registro largo está proporcionando luz relativamente brillante en las longitudes de onda largas y el registro corto produce relativamente poca luz en las longitudes de onda cortas. En cierto sentido, el sistema visual registra los índices de claridad en cada una de las regiones de las longitudes de onda y asigna al cuadrado una terna de números de acuerdo con estos índices.

Fijémonos ahora en un recuadro que sea azul en la proyección. El registro largo está proporcionando poca luz de las longitudes de onda largas al cuadrado, mientras que el registro corto está suministrando una luz relativamente brillante. El sistema visual compara de nuevo la claridad de las longitudes de onda cortas, medias y largas y asigna una terna de números. El color azul no está asignado aún, porque el sistema visual del observador no ha entendido todavía el significado de esta terna de números con relación al color.

El proceso se repite con cada cuadrado que se ve en la proyección, al parecer de forma automática y sin la necesidad de arrastrar los ojos sobre las imágenes. A cada cuadrado se le asigna una cierta terna de números según sea la luz en las longitudes de onda cortas, medias y largas. Después se comparan estas ternas. Por ejemplo, a un cuadrado con una terna indicadora de que presenta la misma intensidad de luz en las tres regiones de longitud de onda se le asigna el color blanco, a otro cuya terna indica menos luz en las longitudes de onda medias, y aún menos en las cortas, se le asigna el rojo; a un tercer cuadrado que, en comparación con el cuadrado blanco, tenga menos luz en las longitudes de onda medias y aún menos en las largas, se le asigna el azul; a un cuadrado que sea claro en las longitudes de onda medias, un poco más oscuro en las largas y aún más oscuro en las cortas se le puede asignar el amarillo. Y así sucesivamente, hasta que se haya interpretado tanto color como sea posible de la imagen proyectada.

Supongamos ahora que la carta no tiene cuadrado blanco de referencia, ¿se destruiría por ello el proceso de asignación de colores? La respuesta es no, ya que las ternas seguirían asignadas a cada cuadrado y, por tanto, comparadas. Dado que se está enviando luz roja desde el proyector del registro largo, ésta puede actuar como punto de referencia. Por ejemplo, a una terna que sea relativamente deficiente en las longitudes de onda largas, menos pobre en las medias y muy fuerte en las cortas puede asignársele el azul en comparación con el cuadrado rojo. El experimento funciona mejor (en el sentido de que se distinguen con nitidez los colores) si los filtros usados para la fotografía tienen bandas de paso que no se solapen. De esta forma, la luz y las sombras oscuras de las filminas se distinguen mejor.



Modelo de A. A. Fote para colocar una película fina de aceite sobre una superficie de metal

La explicación de la asignación de color que he presentado aquí constituye sólo un breve resumen de un modelo más amplio desarrollado por E. Land y McCann y sus colegas. El lector interesado debería leer sus artículos para obtener así una explicación más detallada. De todas formas, dado que los experimentos de Szabo son baratos y bastante fáciles de hacer, quizás el lector se anime a repetir alguno de ellos por su cuenta.

He recibido muchas cartas sobre estereoscopios y fotografías estereoscópicas, que describí en mi artículo de febrero. Todo parece indicar que hay muchos lectores que están haciendo sus propias fotografías y filminas con esos dispositivos.

Algunos aficionados destacaban que yo mencionaba dos puntos sobre la fabricación propia de fotografías estereoscópicas. Primero, un par estereoscópico en el cual la segunda exposición se hacía girando la cámara tiene menos profundidad que uno en el que la segunda exposición se hace desplazando la cámara hacia un lado. Segundo, no se debe pensar que colocando un par de fotografías idénticas en el estereoscopio se puede lograr el mismo efecto que al colocar un par estereoscópico verdadero. Con ambos tipos de par estereoscópico el ojo puede utilizar pistas de fondo relativas al tamaño de los objetos y la geometría de las cosas, pero con fotografías idénticas es obvio que no se pueden conseguir pistas de fondo de la convergencia de los ojos.

Un motivo aparente de controversia es si desplazando la cámara entre las dos exposiciones una distancia mayor que la distancia interocular se produce una profundidad exagerada en el par estereoscópico. Un lector, Philip R. Pennington de Portland, Oregón, dice no haber visto jamás tal exageración ni siquiera en pares estereoscópicos separados por varios kilómetros. Otros lectores dicen que hacen uso regular de la distorsión de profundidad que ofrecen amplias líneas de base, sobre todo en fotografías aéreas concebidas para aumentar las variaciones de perfil de la tierra.

Unas de las muestras más bonitas de fotografías estereoscópicas que he recibido venían remitidas por James Raymond de Fairbanks, Alaska, que fotografió el Monte McKinley con una línea de base de unos 600 metros mientras volaba en un avión. He recibido también un asombroso par estereoscópico de Ralph C. Eagle, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Pennsylvania. Eran microfotografías hechas con un microscopio electrónico que mostraban células del cáncer de una muestra de iris humano. La muestra había sido

girada varios grados entre ambas exposiciones y la profundidad se aprecia fácilmente.

Cuando hablé de los colores en las pompas de jabón en mi artículo de noviembre, describí brevemente el problema de extender una película fina en una superficie que tiene un índice de refracción más alto que la película. A. A. Fote, de la Aerospace Corporation, me ha expuesto una buena idea para conseguirlo. Con el fin de investigar el comportamiento de los aceites lubricantes bajo condiciones ambientales, preparó capas finas de aceite sobre superficies de metal. Cuando las capas son lo suficientemente finas, muestran colores de interferencia similares a los que se ven en muchas películas de jabón.

Fote mezcla una solución de aceite Apiezon con heptano de manera que el aceite sea del 20 al 40 por ciento del volumen total. Vierte la solución en un recipiente que tiene una rendija de control en el fondo; se introduce dentro del recipiente la pieza plana de metal que se desea recubrir, en posición vertical. A medida que la solución va saliendo por el fondo queda una capa fina sobre el metal. Dado que el heptano se evapora casi inmediatamente, la película sólo será de aceite. El espesor de la película de aceite puede controlarse de alguna forma cambiando la concentración del aceite en la solución y la velocidad a la que sale la solución. Las capas son más finas cuando las concentraciones son más bajas y el drenaje más lento.

Siguiendo una sugerencia de Fote sustituí el Apiezon *C* por aceite mineral ordinario, que también es soluble en heptano. Para la inmersión coloqué un embudo que drenaba a un recipiente a través de una goma, cerrada parcialmente por una abrazadera de tipo tornillo. Vertí la solución en el embudo y controlé el drenaje ajustando la abrazadera; introduje luego un trozo de metal plano y pequeño en la solución. A medida que ésta drenaba, el trozo de metal se recubría de una capa de aceite mineral. Para que la capa tenga un espesor uniforme hay que estar seguros de que la solución drena a velocidad constante. Con este fin hice mi experimento con un embudo que tenía bordes verticales por arriba y mantuve el trozo de metal en la parte superior.

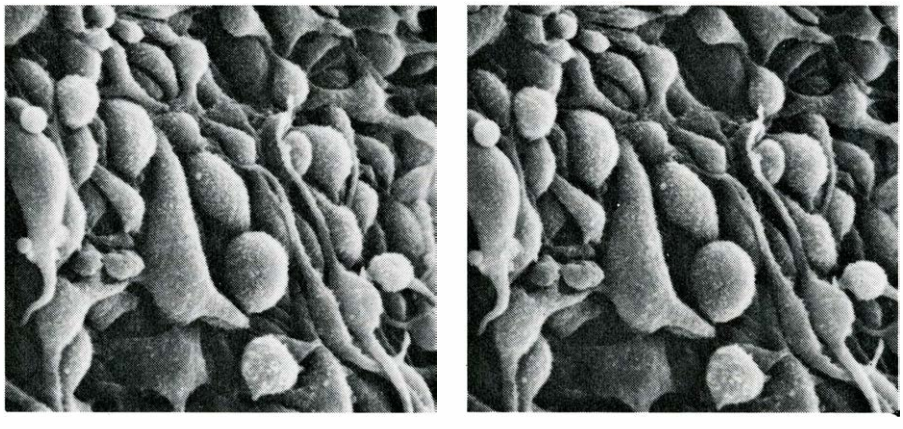
Los índices de refracción relativos de la película y el metal dominan los colores que se ven en las películas de aceite finas (si se trata de capas ultrafinas se ve una capa blanca o negra). Algunos metales tienen un índice de refracción alto (el acero 2,5 aproximadamente); otros tienen valores más bajos (el cobre 0,6 y la plata 0,2). Cuando se aplica un aceite sobre una superficie de un índice de refracción más alto, las capas ultrafinas son transparentes e incoloras. Si se aplica luz blanca en la película, ésta se refleja con el mismo color blanco al observador. Por otro lado, cuando el aceite tiene el índice de refracción mayor, la película ultrafina es oscura.

Las películas algo más espesas producen bandas de interferencia y gran variedad de colores, que probablemente el lector ha observado alguna vez en baterías de cocina metálicas. Cuando se oxida la superficie metálica de ollas y sartenes, la delgada capa de óxido actúa como una película fina y contribuye a la formación de los colores creados por la interferencia de luz. Los primeros metales que introduje en mi baño de aceite no produjeron interferencia de colores, aunque sí pude ver claramente las películas de aceite. Fote justifica este hecho diciendo que quizá mis metales no estaban suficientemente pulidos como para hacer posibles las interferencias. Existen al menos tres factores implicados en ello. Primero, las capas más finas (lo suficientemente finas para que existan interferencias perceptibles) son más probables en una superficie de metal muy lisa. Segundo, una superficie de metal muy áspera destruye la coherencia de las ondas de luz que es necesaria para la interferencia. Tercero, con una superficie áspera el espesor de la capa variará tan rápidamente de punto a punto que los colores de interferencia se mezclarán, apreciándose un color global blanco.

Para entender el segundo factor hay que seguir la trayectoria de un rayo de luz en la película. Un rayo incidente en una película se divide en dos rayos: uno que se refleja inmediatamente y otro que pasa a través de la película y se refleja por detrás de ésta. Si la superficie posterior, próxima al metal, es áspera, el rayo no se reflejará hacia fuera en la misma dirección que el rayo reflejado de la superficie anterior. Las ondas de los rayos no pueden, por tanto, interferir. Si se quiere que una superficie de metal muestre colores de interferencia en una película de aceite que la recubre, la superficie debe ser tan pulida que pueda verse la propia imagen reflejada en ella. Conseguí colores claros y muy bonitos con un cuchillo de cocina de acero inoxidable. Los colores incluían el rosa, azul y verde con algunas zonas de amarillo y marrón. Cuanto más fina era la película, más amplias se mostraban estas bandas, como ocurre con las películas de jabón.

Parece más difícil predecir los colores con estas películas de aceite que con las de jabón, porque la intensidad de la reflexión de luz de las superficies de metal varía considerablemente con la longitud de onda y con el ángulo de reflexión. Para un metal muy pulido, la reflexión de la superficie posterior de la película es mucho más fuerte que la reflexión de la frontal, de forma que los colores de interferencia se pierden en el reflejo blanco de la reflexión posterior. El reflejo parece ser muy fuerte cuando la luz incidente es aproximadamente perpendicular a la película.

Cuando sumergí por primera vez un trozo de metal en el baño de aceite (antes de empezar el drenaje) una capa subió unos 0,5 centímetros por encima de la superficie del metal. Después de un rato, la película formó "lágrimas" que descendían por el metal. En mi cuchillo de cocina pude ver colores de interferencia en la película excepto donde descendían las gotas más gruesas. La película ascendente y la formación de gotas han sido observadas en otras circunstancias desde 1850, más o menos, cuando se descubrió el efecto en vasos de vino. El ascenso suele atribuirse a que el fluido es impulsado hacia arriba por tensiones superficiales desiguales en la película vertical, un efecto bautizado con el nombre de Carlo Marangoni.



Par de microfotografías estereoscópicas de células del cáncer hechas por Ralph C. Eagle

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA FERTILIZACION HUMANA EXTERNA

HAMILTON, BOYN AND MOSSMAN'S HUMAN EMBRYOLOGY: PRENATAL DEVELOPMENT OF FORM AND FUNCTION. 4.ª edición por W. J. Hamilton y H. W. Mossman. W. Heffer & Sons Ltd. 1972.

FERTILIZATION OF HUMAN EGGS IN VITRO: MORALS, ETHICS AND THE LAW. R. G. Edwards en *The Quarterly Review of Biology,* vol. 49, n.º 1, págs. 3-26; marzo, 1974.

RESEARCH ON THE FETUS. National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research. Department of Health, Education, and Welfare Publication n.º (OS) 76-128, 1975.

EL FACTOR DE CRECIMIENTO NERVIOSO

THE NERVE GROWTH FACTOR: ITS MODE OF ACTION ON SENSORY AND SYMPATHETIC NERVE CELLS. Rita Levi-Montalcini en *The Harvey Lectures,* Series 60, págs. 217-259; 1966.

NERVE GROWTH FACTOR FROM MOUSE SUBMAXILLARY GLAND: AMINO ACID SEQUENCE. Ruth Hogue Angeletti y Ralph A. Bradshaw en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 68, n.º 10, págs. 2417-2420; octubre, 1971.

THE RETROGRADE AXONAL TRANSPORT OF NERVE GROWTH FACTOR. I. A. Hendry, K. Stöckel, H. Thoenen y L. L. Iversen en *Brain Research,* vol. 68 n.º 1, págs. 103-121; 15 de marzo de 1974.

NERVE GROWTH FACTOR. William C. Mobley, Alfred C. Server, Douglas N. Ishi, Richard J. Riopelle y Eric M. Shooter en *The New England Journal of Medicine,* vol. 297, n.º 20, págs. 1096-1104, 17 de noviembre de 1977; vol. 297, n.º 21, págs. 1149-1158, 24 de noviembre de 1977; vol. 297, n.º 22, págs. 1211-1218, 1 de diciembre de 1977.

NERVE GROWTH FACTOR POTENTIATES ACTOMYOSIN ADENOSINETRIPHOSPHATASE. Pietro Calissano, Gianni Monaco, Loriana Castellani, Delio Mercanti y Andrea Levi en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 75, n.º 5, págs. 2210-2214; mayo, 1978.

CONTROL AUTOMATICO POR INTELIGENCIA DISTRIBUIDA

DIRECT DIGITAL PROCESS CONTROL: PRACTICE AND ALGORITHMS FOR MICROPROCESSOR APPLICATION. D. M. Auslander, Y. Takahashi y Y. Tomiyuka en *Proceedings of the IEEE,* vol. 66, n.º 2, págs. 199-208; febrero, 1978.

SPECIAL ISSUE ON LARGE-SCALE SYSTEMS AND DECENTRALIZED CONTROL. *IEEE Transactions on Automatic Control,* vol. AC-23, n.º 2; abril, 1978.

TEORIA DE NUDOS

KNOTS AND LINKS. Dale Rolfsen. Publish or Perish, Inc., Berkeley, Calif., 1976.

INTRODUCTION TO KNOT THEORY. Richard H. Crowell y Ralph H. Fox. Springer-Verlag, 1977.

UNA MINA DE SILEX NEOLITICA

LA STATION NÉOLITHIQUE DE SAINTE-GERTRUDE. Joseph Hamal-Nandrin y Jean Servais en *Revue Anthropologique,* vol. 33, págs. 345-492; 1923.

DER ÄLTESTE BERGBAU IN EUROPA. Martin Jahn. Akademie-Verlag, Band 52, Heft 2, 1960.

5000 JAHRE FEUERSTEINBERGBAU IN DEN NIEDERLANDEN. F. H. G. Engelen en *Der Anschnitt,* vol. 21, n.º 2, 1969.

NEUTRONES ULTRAFRIOS

ELECTRIC DIPOLE MOMENT OF THE NEUTRON. R. Golub y J. M. Pendlebury en *Contemporary Physics,* vol. 13, n.º 6, págs. 519-558; noviembre, 1972.

ULTRACOLD NEUTRONS. V. I. Luschikov en *Physics Today,* vol. 30, n.º 6, págs. 42-51; junio, 1977.

ULTRA-COLD NEUTRONS. R. Golub y J. M. Pendlebury en *Reports on Progress in Physics.* Institute of Physics, marzo, 1978.

LA HISTORIA DEL ATLANTICO

AN ANALYSIS OF THE VARIATION OF OCEAN FLOOR BATHYMETRY AND HEAT FLOW WITH AGE. Barry Parsons y John G. Sclater en *Journal of Geophysical Research,* vol. 82, n.º 5, págs. 803-827; 10 de febrero de 1977.

THE PALEOBATHYMETRY OF THE ATLANTIC OCEAN FROM THE JURASSIC TO THE PRESENT. John G. Sclater, Steven Hellinger y Christopher Tapscott en *The Journal of Geology,* vol. 85, n.º 5, págs. 509-552; septiembre, 1977.

LAS MICROCINAS

A NEW FAMILY OF LOW MOLECULAR WEIGHT ANTIBIOTICS FROM ENTEROBACTERIA. C. Asensio, J. C. Pérez-Díaz, M. C. Martínez y F. Baquero, en *Biochem. Biophys. Res. Commun.,* vol. 69, págs. 7-14, 1976.

ECOLOGIA MOLECULAR. C. Asensio, en *Avances de la Bioquímica,* editado por L. Cornudella y col., Salvat, Barcelona, 1977.

MICROCIN PLASMIDS: A GROUP OF EXTRACHROMOSOMAL ELEMENTS CODIFYING FOR LOW MOLECULAR ANTIBIOTICS ESCHERICHIA COLI. F. Baquero, D. Bouanchaud, M. C. Martínez-Pérez y C. Fernández, en *J. of Bacteriol.* vol. 135, págs. 342-437, 1978.

EXTRACHROMOSOMALLY DETERMINED ANTIBIOTIC PRODUCTION. D. A. Hopwood, en *Ann. Rev. Microbiol.,* vol. 32, págs. 373-392, 1978.

JUEGOS MATEMATICOS

ON COLORING THE $N \times N$ CHESSBOARD. M. R. Iyer y V. V. Menon en *The American Mathematical Monthly,* vol. 73, n.º 7, págs. 721-725; septiembre, 1966.

INDEPENDENT PERMUTATIONS, AS RELATED TO A PROBLEM OF MOSER AND A THEOREM OF PÓLYA. Ashok K. Chandra en *Journal of Combinatorial Theory, Series A.* vol. 16, n.º 1, págs. 111-120; enero, 1974.

TALLER Y LABORATORIO

INTERFERENCE COLOR. Hiroshi Kubota en *Progress in Optics: vol. 1,* dirigido por E. Wolf. North-Holland Publishing Company, 1961.

LIGHTNESS AND RETINEX THEORY. Edwin H. Land y John J. McCann en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 61, n.º 1, págs. 1-11; enero, 1971.

Taller y laboratorio

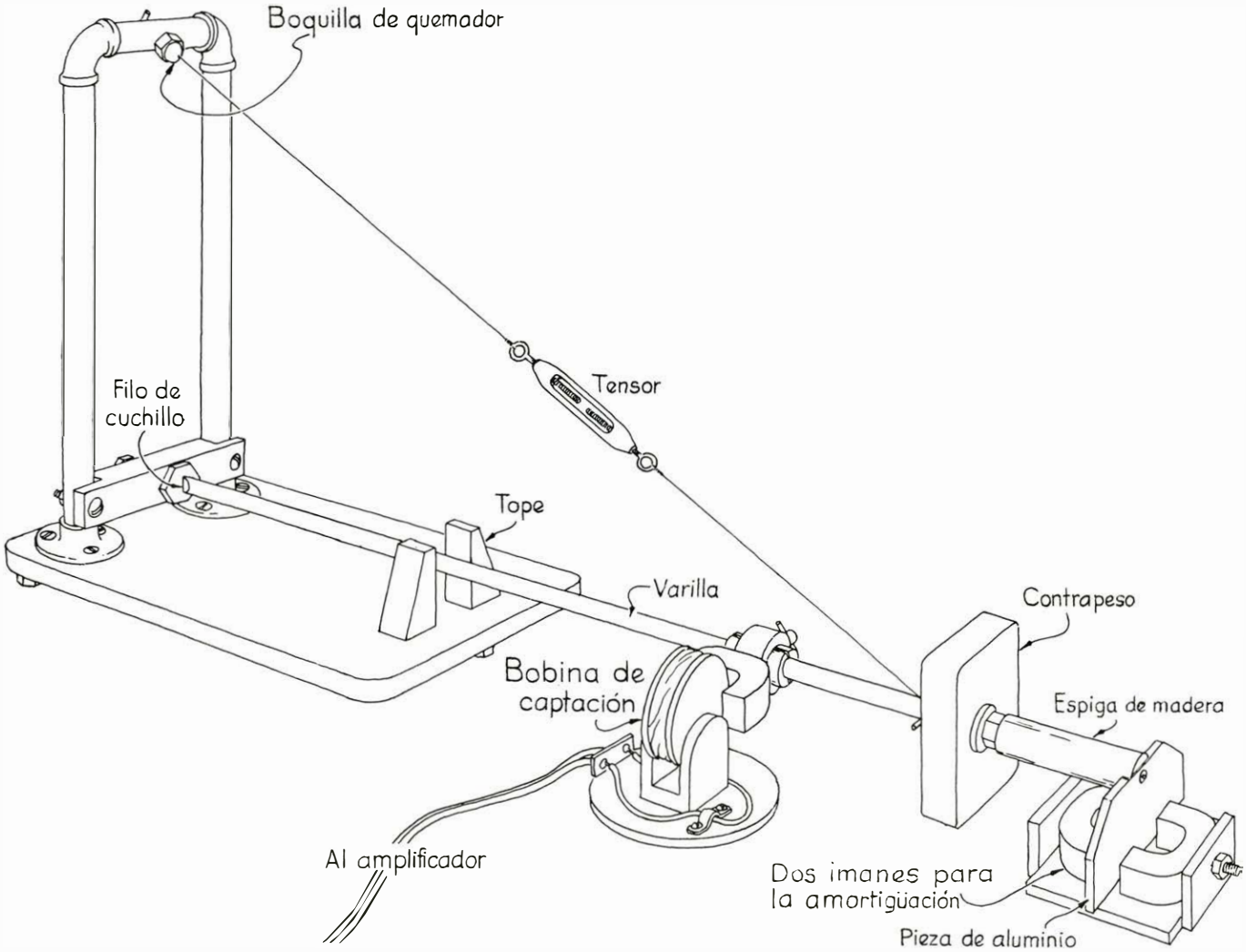
Cómo construir un sencillo sismógrafo para registrar en casa los temblores de tierra

Jearl Walker

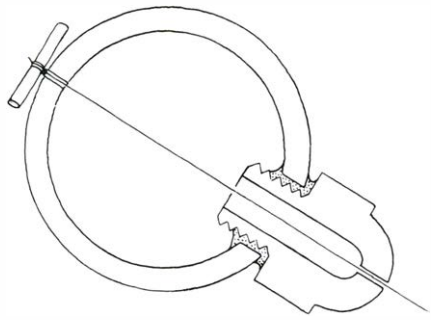
Este mes describiremos el sismógrafo construido por James D. Lehman, de la Universidad James Madison en Harrisonburg, Virginia. El propio Lehman me ha enviado las instrucciones para construir el aparato. Además de poderse fabricar con bastante facilidad, es lo suficientemente sensible como para registrar los terremotos que se produzcan a unos 3000 kilómetros de distancia y tengan una intensidad igual o mayor que 4,8 en la escala de Richter y también todos los terremotos de intensidad 6, como mínimo, originados en cualquier lugar de la tierra. Lehman registró una prueba subterránea de un artefacto nuclear llevada a cabo en Nevada así como un intenso terremoto ocurrido en Turquía.

El principal objetivo de cualquier sismógrafo es transformar un ligero movimiento de la tierra en otro movimiento mucho mayor que pueda ser grabado sobre un soporte para su examen posterior. Las ondas procedentes de un terremoto ocurrido a una gran distancia no llegan todas al mismo tiempo; unas toman trayectorias más largas a través de la tierra y otras tienen una velocidad menor. Por tanto, el registro debe dibujarse en función del tiempo, de manera que la llegada de los varios componentes de las ondas pueda ser anotada y cronometrada. Los intervalos transcurridos entre los diferentes tiempos de llegada de los distintos tipos de ondas pueden ser utilizados para calcular la distancia a la que se ha producido el terremoto.

De los diversos diseños posibles de sismógrafos, Lehman ha elegido uno de tipo voladizo unido a una tira de papel que servirá de registro. Su aparato consiste básicamente en una varilla con un contrapeso, un imán en forma de herradura incorporado a la varilla y una bobina de alambre situada entre los dos polos del imán. Cuando las ondas sísmicas llegan al sismógrafo, el imán y la bobina se mueven uno con respecto al otro, con lo cual se varía el flujo magnético a través de la bobina. El voltaje generado en la bobina por la variación del flujo se amplía y registra sobre la cinta de papel. Un ligero movimiento del suelo termina, por tanto, transformándose en una gran oscilación sobre el registro. Como el papel se mueve delante del registrador a una velocidad concreta, puede determinarse el inicio y la dura-



El sismógrafo construido por James D. Lehman

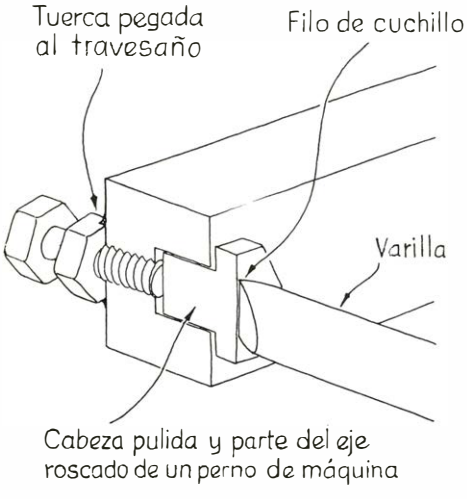


Boquilla para el cable de soporte

ción del movimiento a partir de la gráfica obtenida.

El extremo de la varilla más alejado del contrapeso termina de forma afilada y se mantiene apoyado en un bastidor fijo. El otro extremo está unido a la parte superior del bastidor por un alambre. Los dos puntos de apoyo de la varilla (el extremo afilado y el punto donde el alambre está unido al bastidor) no se hallan en línea vertical. Por tanto, cuando la varilla comience a oscilar inducida por una onda sísmica, lo hará horizontalmente con un movimiento de tipo pendular alrededor de su posición de equilibrio. Caso de tener una oscilación libre de este tipo, lo único que nos mostraría el registro serían las naturales oscilaciones de una varilla movida por las ondas sísmicas, pero se perdería la información sobre los períodos y horas de llegada de cada una de las ondas.

Para evitar dicha pérdida, Lehman ha diseñado su sismógrafo de forma que amortigüe o elimine las oscilaciones rápidas de la varilla. Este amortiguamiento se lleva a cabo gracias a una pieza de aluminio montada en el extremo de la varilla de manera que oscila dentro de un campo magnético. Este movimiento genera una corriente eléctrica en el aluminio, la cual genera, a su vez, su propio campo magnético. Estos



Colocación del extremo afilado

campos magnéticos inducidos se oponen a nuevos movimientos de la varilla, que pronto termina sus oscilaciones.

Si se detiene la oscilación natural, el sismógrafo registra la velocidad relativa entre la varilla y el suelo, toda vez que la varilla y la bobina registradora se mueven una respecto a la otra en razón de sus distintas masas de inercia. La corriente creada en la bobina es proporcional a la velocidad con que dicho elemento se mueve.

Si no hubiera amortiguamiento, la varilla sería más sensible a las ondas sísmicas que tuvieran el mismo período que el del movimiento pendular natural de la propia varilla. Con el amortiguamiento la varilla será más sensible a las ondas sísmicas cuyos períodos sean aproximadamente la mitad de la longitud del período pendular natural de la varilla. Un instrumento construido para responder ante ondas sísmicas con períodos de aproximadamente un segundo se llama sismógrafo de período corto; el que responde a períodos de 10 a 20 segundos es un sismógrafo de período largo. Lehman ajustó su varilla para que su período natural fuera de 12 a 18 segundos; construyó, pues, un instrumento de período largo.

El bastidor principal del sismógrafo consta de una base y dos secciones verticales de tubería. Se aconseja emplear una base metálica rígida, pero también puede utilizarse madera curvada o bien un tablero de conglomerado con suficiente espesor; en este último caso hay que contar con las deformaciones que puede provocar la humedad del ambiente. Lehman construyó su base con una chapa metálica de 40 por 25 centímetros, afirmada con tres tornillos de un centímetro, de los que soldó dos en la parte de atrás y uno en el centro de la parte delantera. Estos tres puntos de apoyo hacían que la base estuviera libre de cualquier sacudida. Pueden colocarse plaquetas metálicas plegadas debajo de los soportes de la base para darle la inclinación deseada antes de poner en funcionamiento el sismógrafo.

La varilla, de acero, mide unos 8 milímetros de diámetro por 75 centímetros de longitud. Uno de los extremos está afilado. En el otro se ha practicado una rosca de unos ocho centímetros. Por dicha rosca se introduce una tuerca hasta el final y, a continuación, un trozo de plomo de 2 a 3 kilogramos de peso, fijándolo con una segunda tuerca colocada acto seguido.

La parte vertical del sismógrafo se halla unida a la base por medio de dos bridas de tubería de 12 milímetros. Ambas están atornilladas a la base de tal manera que sus bordes queden aproximadamente a centímetro y medio de la arista de dicha base. Para unir las bridas a ésta, pueden usarse pernos grandes de madera o bien tornillos metálicos de 6 milímetros. Hay que procurar que dichos tornillos no obstruyan los que sirven de apoyo. Y hasta puede que hayamos de pulir las cabezas de los tornillos de sujeción.

Se introducen dos trozos de tubería de 12 milímetros, con una longitud igual de 45 centímetros y con los extremos roscados, enroscándolos en las bridas. Se situarán dos travesaños entre las piezas verticales, en dos sitios distintos: uno donde el extremo afilado de la varilla choca contra la estructura y otro donde se sujete el alambre que soporta el otro extremo de la varilla. El travesaño inferior es una plaquita de metal atornillada a los tubos verticales. El travesaño superior es un trozo de tubería de 10 centímetros de longitud que se une a las piezas verticales por medio de dos codos con rosca de 12 milímetros.

El alambre que soporta a la varilla se sujeta al centro del travesaño superior. Lehman usa, como punto de sujeción del alambre, la boquilla de un quemador. Las boquillas típicas suelen tener un diámetro de 14 milímetros. Hay que quitar el filtro interior ya que es necesario que el alambre entre por el diminuto agujero. Montar la base, las bridas, las tuberías verticales y el travesaño superior para determinar dónde debe sujetarse el alambre de la varilla. Hay que procurar que el punto de sujeción quede más o menos en el centro del travesaño superior, de suerte que, cuando el aparato quede montado, el alambre forme un ángulo de 30 a 40 grados con la horizontal. Luego se hará una marca en el sitio adecuado sobre la tubería horizontal y se pasará por allí la tubería con un agujero de 14 mílimetros. Introducir en dicho agujero la boquilla y meter por ella el alambre que habremos de sacar por el otro lado de la tubería, donde se anclará.

Lehman sugiere que se emplee bien hilo 26 Nichrome o bien una cuerda de piano. El hilo se dividirá en dos partes, atándose un extremo de cada una de ellas a la boquilla y a un agujero que se habrá practicado en el extremo más alejado de la varilla, respectivamente, en tanto que los otros dos extremos quedan enfrentados entre sí a través de un tensor, con el que haremos que el hilo o alambre quede tirante.

El travesaño inferior es un trozo plano de metal atornillado a los trozos de tubería verticales, a unos cinco centímetros de la base. A él debe engarzarse un trozo de metal duro, como la cabeza de tornillo pulida. El borde afilado de la

varilla se apoyará sobre dicha plaquita de metal duro con el borde afilado en posición vertical. Cuando el sismógrafo esté por fin montado, la boquilla debe sobresalir como un centímetro de la vertical de la placa donde apoya el borde afilado de la misma. A tal fin resultaría provechoso colocar una superficie metálica ajustable.

Incorpórese luego a la varilla un imán en forma de herradura. Lehman tiene uno con 25 kilogramos de fuerza tractora. El imán deberá tener una abertura de 2,2 centímetros (7,8 pulgadas). En dicha abertura deberá colocarse la bobina que enviará al equipo eléctrico las señales referentes al movimiento relativo entre el imán y la bobina. Lehman usa una abrazadera y unos trozos de madera para unir el imán a la varilla cerca del fragmento de plomo.

Tendremos la bobina registradora si damos 10.000 o más vueltas de hilo magnético número 34 en un carrete. Si se posee un imán de Edmund Scientific la bobina debe tener 1,9 centímetros de anchura y 8 de diámetro para que pueda colocarse con holgura de 5 a 10 milímetros en el interior de la abertura del imán, y disponga así suficiente espacio libre por ambos lados. Lehman se construyó su bobina o carrete pegando dos piezas circulares de plástico de 2 milímetros de espesor a un cilindro de madera de 2,5 centímetros de diámetro. Colocó el carrete en el eje de una máquina taladradora y fue enrollando cuidadosamente el hilo mientras hacía girar la máquina a baja velocidad (hay que prestar mucha atención al manejo de la máquina, ya que no es difícil cortarse en un dedo con el hilo). A través de un cable eléctrico normal llevó los extremos del hilo al amplificador. El cable no debe medir más de tres metros de longitud, pues de lo contrario nos toparíamos con una resistencia eléctrica demasiado grande.

Pondremos la bobina sobre una base estable, con tres puntos de apoyo como la base principal. Nos aseguraremos de no emplear ningún material magnetizable. Así, para la base se recurre a una pieza de aluminio con soporte de latón para que la bobina opere a mayor celeridad.

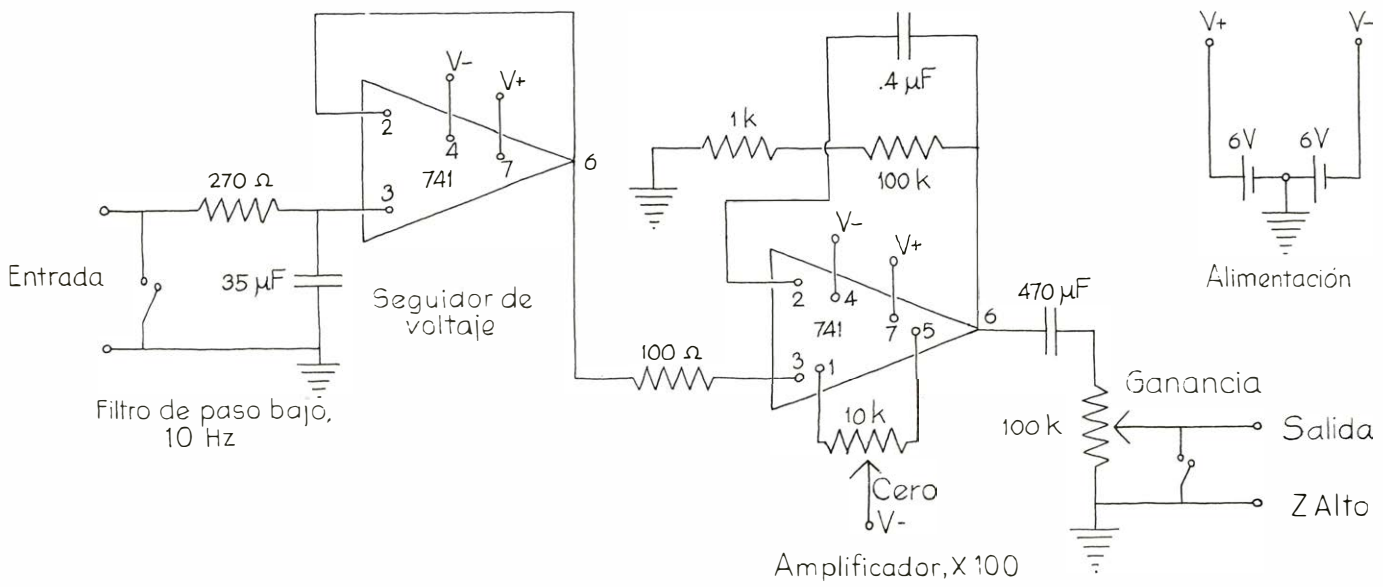
En el otro extremo de la varilla, el no afilado, se necesita otro campo magnético que amortigüe las oscilaciones de la varilla. Lehman montó dos imanes Edmund sobre una base de madera, orientándolos de forma que se atrajeran mutuamente. Después enroscó una clavija de madera al extremo de la varilla, y al extremo de la clavija fijó una pieza plana de aluminio (8 centímetros de ancho) con la idea de que dicha pieza quedara situada entre los dos imanes, de manera que, cuando la varilla oscile, la pieza de aluminio también lo haga entre ambos imanes. La corriente que entonces se creará en el aluminio generará un campo magnético que se opondrá al movimiento, frenando por tanto las oscilaciones de la varilla.

El sismógrafo debe estar totalmente cubierto al objeto de protegerlo de las corrientes de aire que se producen en la habitación, debidas tanto a la convección del lugar como al aire acondicionado. La montura de protección será de cristal o de plástico transparente para que pueda observarse.

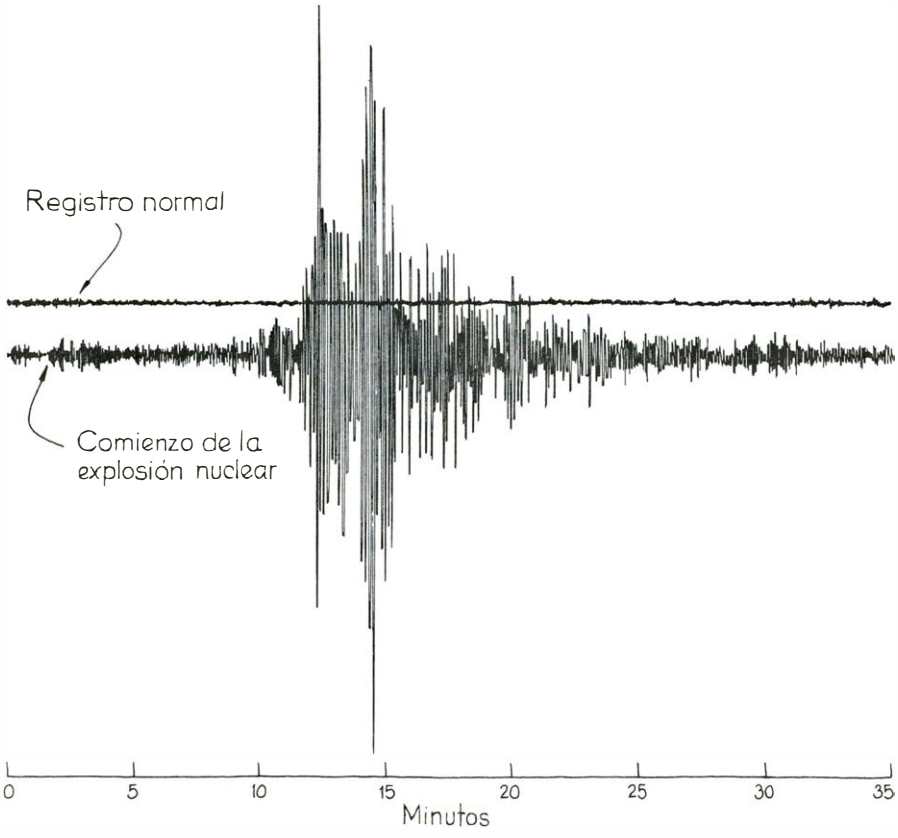
El voltaje de la bobina se leerá a través del amplificador. Podemos comprar un amplificador de corriente continua o bien nos lo podemos fabricar siguiendo las indicaciones de la ilustración inferior. Lehman dice que dicho circuito opera normalmente multiplicando la señal por un factor de 10. El circuito se puede montar sobre un tablero de fibra o bien dentro de una pequeña caja. Las interferencias a 60 hertz procedentes de la instalación eléctrica de la habitación se filtran en la etapa de entrada al amplificador así como cualquier ruido mecánico en un rango de frecuencia de 10 hertz o más. Las señales sísmicas caen dentro del rango de 1 a 1/15 hertz y, por tanto, pasan a través del filtro. La primera entrada 741 actúa como un seguidor de voltaje con respecto al voltaje de la bobina registradora. La segunda entrada 741 actúa como un centumultiplicador. Lehman mantiene que con dos pilas, tipo linterna, de seis volt, el amplificador puede trabajar durante varios meses.

La salida del amplificador ha sido diseñada para ajustarse al nivel de los 10 milivolt del registrador gráfico de Lehman. Comenta que la velocidad de paso del papel de ese modelo es tan precisa que no necesita un sistema adicional de control de tiempo. Para la impresión se pueden utilizar de forma satisfactoria rotuladores. Los cartuchos de tinta pueden volverse a utilizar rellenándolos con un cuentagotas de los que se expenden en farmacias. Durante un día de marcha se gastan aproximadamente dos tercios de un cartucho.

Si se tiene que comprar otro tipo de registrador gráfico, Lehman pone mucho énfasis en la importancia de encontrar uno que controle de forma independiente la velocidad del papel y el movimiento de la pluma. El sujetador de la



Circuito del amplificador



Registro de Lehman de un experimento nuclear

pluma debe ser articulado de forma universal y el papel fácilmente extraíble rebobinando o por cualquier otro sistema.

Lehman consiguió papel de 25 centímetros standard para su aparato y lo hacía pasar a una velocidad de 30 centímetros por hora, de manera que los intervalos en el papel eran de medio centímetro por minuto. Al aprovechar el papel por ambos lados Lehman reduce el coste del mismo a la mitad. Calculó que con impresión diaria durante todo el año el coste de papel sería de sólo 10 dólares.

Para poner en funcionamiento el sismógrafo hay que quitarle la varilla y el cable de soporte, después se nivela la base colocando tantas arandelas de metal o cuñas debajo de las patas cuantas sean necesarias. Para nivelarlo bien se aconseja utilizar un nivel de burbuja. La boquilla del soporte superior debe estar aproximadamente un centímetro por fuera de la vertical donde se apoyará el extremo afilado de la varilla en el soporte inferior. Para conseguir esto es posible que sea necesario cambiar la pieza de soporte inferior o poner arandelas bajo las dos patas traseras de la base.

Se coloca luego la varilla. Se ata el cable al tensor de modo que la varilla esté horizontal y el borde afilado esté vertical en su placa. Para comprobar el período de oscilación hay que empujar ligeramente la varilla y el período debe durar entre cuatro y ocho segundos. Hay que comprobar también su posición en reposo, siendo la normal horizontal y perpendicular a la placa de metal sobre la cual descansa el extremo afilado. En el otro extremo de la varilla pueden añadirse topes a ambos lados, a unos 6 milímetros de distancia de la posición de reposo del péndulo, para evitar que éste oscile mucho mientras se está ajustando el sismógrafo. Con los topes bien colocados la posición de reposo debería estar obviamente a mitad de camino entre ambos.

Se debe dejar el sismógrafo inactivo durante varios días, al objeto de que el marco se ajuste a la tensión y el cable se estire. Se ajustará luego la varilla de forma que su período natural de oscilación sea de 12 a 18 segundos. Para elevar el período de oscilación a esta frecuencia hay que poner una placa de metal debajo de la ya existente donde se apoya el extremo afilado o bien el soporte delantero de la base. De esta forma se reduce la distancia en que la boquilla se aparta de la vertical del punto de apoyo del borde afilado. Si se quisiera inclinar el conjunto tanto que la boquilla estuviera justo en la vertical del filo de cuchillo, la varilla ya no oscilaría como un péndulo normal, porque no habría fuerza recuperadora que lo impulsara a retornar a su posición de reposo. Cuando el conjunto está debidamente alineado, la boquilla se halla fuera de la vertical del extremo afilado y la varilla tiende constantemente a su posición de reposo por su propio peso. Cuanto más lejos esté la boquilla de la vertical referida, mayor será la fuerza recuperadora y menor el período de oscilación natural de la varilla. Hay que ajustar la alineación de la boquilla y el extremo afilado, de modo que el período natural sea entre 12 y 18 segundos. La varilla se mostrará así sensible a las ondas sísmicas de períodos ligeramente más cortos.

El siguiente paso va a ser ajustar la amortiguación. En primer lugar se comprueba ésta colocando los imanes de amortiguación en su sitio alrededor de la placa vertical de aluminio y, luego, haciendo oscilar el extremo de la varilla sobre una distancia de un centímetro aproximadamente. Cuando se suelta el extremo, oscilará hasta sobrepasar la posición de descanso. Con la amortiguación adecuada, el exceso deberá ser de unos dos milímetros. Se puede ajustar la amortiguación por medio de la ranura existente entre los imanes; si se cierra la ranura se incrementa el campo magnético y la amortiguación. También se puede ajustar haciendo variar el período de oscilación natural de la varilla. Así, un período más largo significaría menor fuerza restauradora, de modo que con el mismo campo magnético la amortiguación se incrementaría.

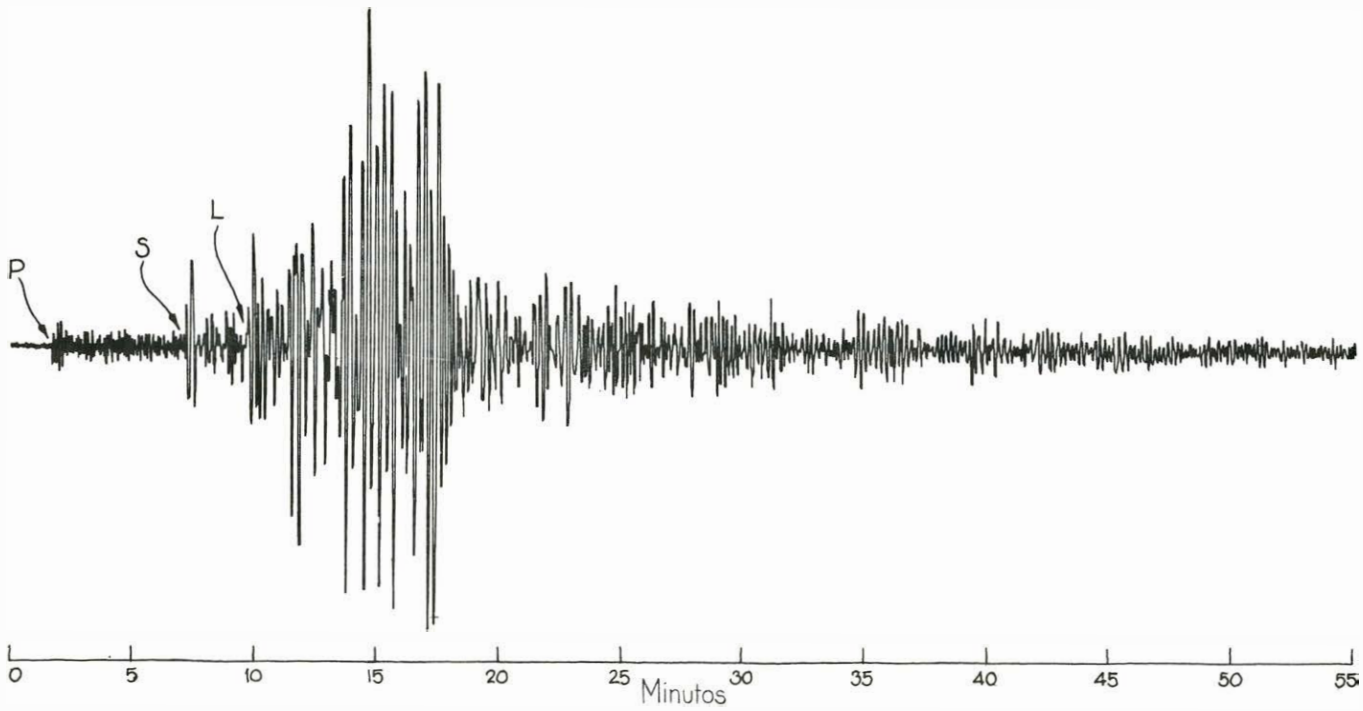
Con este proceso se consigue un ajuste grosero de la amortiguación. Sitúese luego la bobina en relación al imán que está unido a la varilla, de suerte que ambos estén a la altura adecuada del suelo y que la bobina se halle a unos 6 milímetros dentro de la ranura del imán cuando el fiel señala su punto de reposo. Se cubre todo el conjunto. Ajustamos la ganancia del amplificador hasta que pueda verse el ruido de fondo registrado en el papel. Lehman dice que si entonces se acerca uno al sismógrafo la vibración del suelo producida por el peso debería registrarse en el papel del mismo con una amplitud de unos 7 centímetros.

Para comprobar la amortiguación hay que acercarse andando hasta el sismógrafo, esperar unos segundos y después alejarse. El papel del registro deberá mostrar dos picos por el avance y dos por el retroceso. El primer pico de cada par corresponde a la vibración del suelo al avanzar; el segundo, más pequeño, representa el exceso de la varilla al sobrepasar su posición de reposo. Si la varilla está debidamente amortiguada, la razón de los dos picos debería oscilar entre 6:1 y 10:1; en caso de que no ocurra tal, habrá que ajustar la amortiguación. Lehman señala que es necesario tener

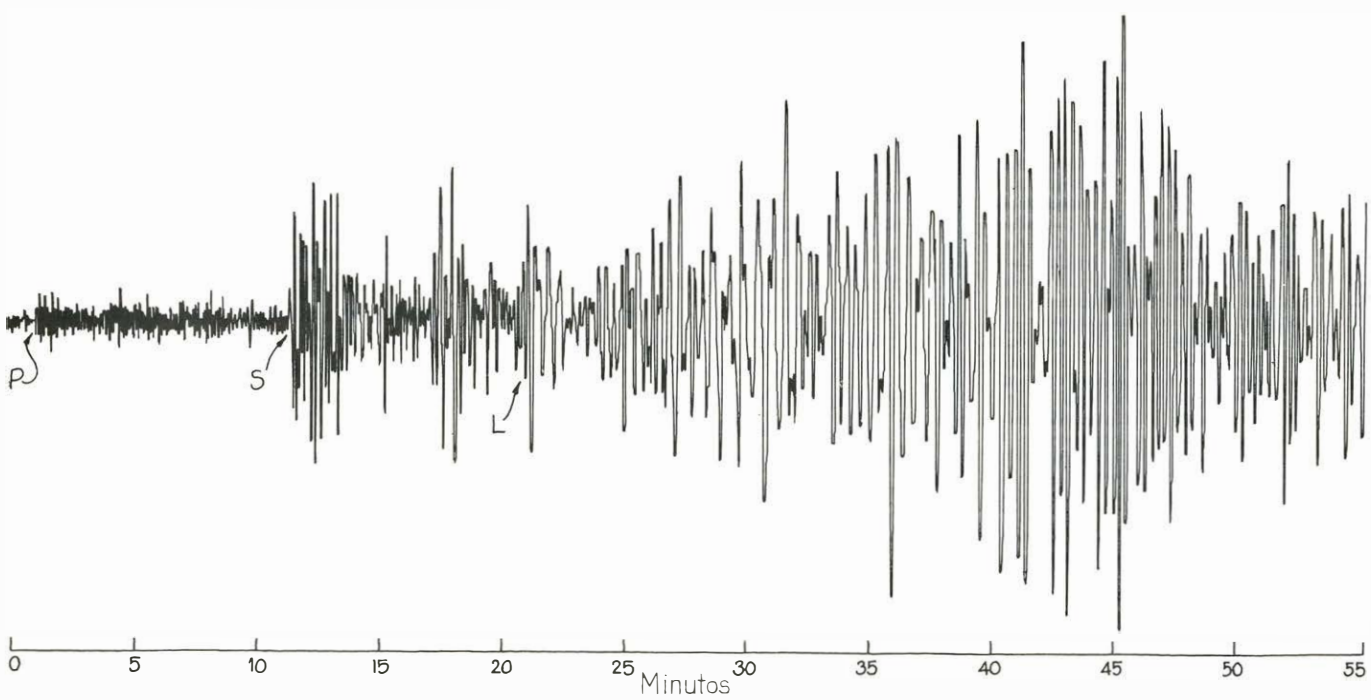
paciencia hasta alcanzar la amortiguación correcta, pero una vez que se consigue, el instrumento no necesitará mayor atención durante semanas o incluso meses.

El mejor sitio para colocar el sismógrafo es una habitación donde no entre nadie y donde no se produzcan cambios térmicos. No hay que colocarlo donde le dé el sol ni en el suelo, porque las variaciones resultantes en la tensión del suelo se registrarán en las lecturas. Se debe tener en cuenta que, aun cuando el sol no entre directamente en la habitación, ésta puede sufrir cambios térmicos causados por los rayos de sol que dan en la fachada. Lehman tuvo éxito colocando uno de sus aparatos en un suelo de arena en una parte inacabada de su patio. Dado que el sismógrafo es más sensible a las ondas que pasan perpendicularmente a la varilla, y puesto que la mayoría de los terremotos se producen en un azimut este-oeste, convendrá instalar el sismógrafo con la varilla en dirección norte-sur.

Cuando se empiezan a hacer registros se aprecia un ruido de fondo constante en las lecturas; gran parte de este ruido se debe a microseísmos, que son pequeñas oscilaciones de la tierra que aún no han sido debidamente explicadas. Los investigadores han intentado desde hace mucho tiempo relacionar los microseísmos con fenómenos naturales tales como los golpes del oleaje en las costas acantiladas o la presencia de un ciclón en el océano. Aunque algunas veces la conexión entre los microseísmos y tales



Registro de un terremoto en Las Galápagos el 29 de marzo de 1976



Registro resultante de un terremoto en Turquía el 24 de noviembre de 1976

causas ha parecido muy clara, en otras se decía que no tienen relación alguna.

En algunos de los datos que Lehman me ha enviado se pueden identificar nuevas causas de ruidos en los registros. Por ejemplo, un día un pequeño grupo de picos reveló una explosión en una cantera o construcción próxima. En otro registro apareció un frente frío representado por un conjunto continuado pero casual de picos. En dos ocasiones al menos, Lehman ha conseguido mostrar los efectos de los huracanes en el Atlántico.

Sin embargo, es probable que el lector centre su interés en conseguir registrar ondas sísmicas. Estas ondas son de cuatro tipos principales (existen otros tipos menos importantes y subtipos que no mencionaré). Dos de ellas se propagan a través de la tierra, pero de forma diferente y a distinta velocidad. Una es la onda transversal, llamada *S*. El material que participa en el movimiento de la onda oscila perpendicularmente a la dirección del movimiento de la misma. El término "transversal" significa que transmite ese sentido de oscilación. La mayoría de las ondas que conocemos son transversales; por ejemplo, las de la cuerda de una guitarra o de la superficie del agua.

El otro tipo de ondas que se extiende por la tierra son las longitudinales designadas *P*. Aquí el material que participa en el movimiento de la onda oscila hacia adelante y hacia atrás en la dirección en que se está moviendo la onda. El término "longitudinal" se usa aquí para indicar el hecho de que las oscilaciones son paralelas a la dirección de la onda.

Los otros dos tipos generales de ondas sísmicas se propagan a lo largo de la superficie de la tierra. Con un tipo, las denominadas ondas Love (*L*), el material que participa en el movimiento de la onda oscila transversalmente a la dirección del movimiento de la misma y horizontalmente con relación a la superficie de la tierra. Con el otro tipo, llamado ondas de Rayleigh (*R*), el material se mueve en cursos elípticos perpendiculares a la superficie y alineados en torno a la dirección de movimiento de la onda.

Si llegaran todas estas ondas a un sismógrafo al mismo tiempo, el aficionado no sería capaz de distinguirlas, pero no llegan a la vez porque o bien toman diferentes rutas o viajan a distintas velocidades. Las primeras en llegar son las ondas *P*; éstas y las ondas *S* toman un rumbo directo a través de la tierra, viajando las *P* más deprisa que las *S*. Después llegan las *S*, seguidas de los dos tipos de ondas superficiales, cuyo retraso se debe a que viajan sobre un largo recorrido por la superficie de la tierra.

El tiempo que transcurre entre la llegada de las *P* y las *S* se puede usar para determinar la distancia entre el observador y el centro del terremoto. En referencias sismográficas tales como el libro de Markus Bath citado en la bibliografía de este mismo número se encuentran tablas relativas a la diferencia en los tiempos de llegada y las distancias correspondientes. La distancia se cita con frecuencia en términos de la distancia angular entre el epicentro del terremoto y el sismógrafo medida desde el centro de la Tierra. Por ejemplo, si la diferencia en tiempos de llegada es unos 7 minutos 11 segundos, el epicentro estará a unos 50 grados del observador.

Con un instrumento simple se puede suponer sólo la dirección. La determinación aproximada de la misma puede hacerse con dos instrumentos orientados perpendicularmente entre sí (un sismógrafo siguiendo el eje norte-sur y el otro el este-oeste). La determinación precisa de la distancia, dirección y profundidad del epicentro se obtiene sólo cuando registran el hecho varias estaciones de sismógrafos muy separadas entre sí. La diferencia en tiempos de llegada de las ondas a las estaciones proporciona el dato de dónde se halla el epicentro.

Pero no sólo se pueden registrar ruidos de fondo y terremotos. Las explosiones nucleares subterráneas también envían ondas sísmicas a través de la tierra y a lo largo de su superficie. Lehman ha registrado cierto número de ellas que ocurrieron en Nevada, siete exactamente, en el primer trimestre de 1976.

Lehman me ha enviado varios ejemplos de datos de terremotos, dos de los cuales son especialmente llamativos. Uno es un registro del terremoto que sucedió en Las Galápagos el 29 de marzo de 1976 a las 0539:33 UTC. El movimiento tenía un epicentro poco profundo, una magnitud de 6,7 y aparentemente resultó del corrimiento a lo largo del borde entre las placas tectónicas de Cocos y Nazca. Seis minutos y 57 segundos después de haber empezado el terremoto, las ondas *P* alcanzaron el registro de Lehman. Tenían períodos que oscilaban de uno a tres segundos y fueron registradas durante más de cinco minutos. Las ondas *S* tardaron 12 minutos y 28 segundos en llegar, ya que tenían períodos más largos y mayores amplitudes que las *P*. Las ondas superficiales tardaron unos 15 minutos en llegar y tenían períodos desde 12 a 15 segundos. Las oscilaciones continuaron durante casi una hora. La diferencia en los tiempos de llegada de las ondas *P* y *S* (cinco minutos 31 segundos) indicó que el epicentro estaba a unos 3930 kilómetros del aparato de Lehman.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LOS EFECTOS INMEDIATOS Y RETARDADOS DE LA GUERRA NUCLEAR

LONG-TERM WORLDWIDE EFFECTS OF MULTIPLE NUCLEAR-WEAPONS DETONATIONS. National Academy of Sciences, Washington, D.C., 1975.

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS. Dirigido por Samuel Glasstone y Philip Dolan. U.S. Departments of Defense and Energy, Government Printing Office, 1977.

SOVIET CIVIL DEFENSE. Informe del Director de la Oficina de Inteligencia, Bureau of Public Affairs, Office of Public Communications; julio, 1978.

EL VIRUS DE EPSTEIN-BARR

THE ONCOGENICITY OF EPSTEIN-BARR VIRUS. G. Miller en *The Journal of Infectious Diseases,* vol. 130, n.º 2, págs. 187-205; agosto, 1974.

THE EPSTEIN-BARR VIRUS AND NEOPLASIA. George Klein en *The New England Journal of Medicine,* vol. 293, n.º 26, págs. 1353-1357; 25 de diciembre de 1975.

RECENT PROGRESS IN EPSTEIN-BARR VIRUS RESEARCH. M. A. Epstein y B. G. Achong. en *Annual Review of Microbiology,* vol. 31, págs. 421-445; 1977.

THE IMMUNOLOGICAL APPROACH TO STUDY OF POSSIBLY VIRUS-INDUCED HUMAN MALIGNANCIES USING THE EPSTEIN-BARR VIRUS AS EXAMPLE. W. Henle y G. Henle en *Progress in Experimental Tumor Research,* vol. 21: *Viruses and Human Cancer,* dirigido por Yohei Ito. S. Karger, 1978.

EL PARSEC CENTRAL DE LA GALAXIA

INFRARED OBSERVATIONS OF THE GALACTIC CENTER, I: NATURE OF THE COMPACT SOURCES. E. E. Becklin, K. Matthews, G. Neugebauer y S. P. Willner en *The Astrophysical Journal,* vol. 219, n.º 1, parte 1, págs. 121-128; 1 de enero de 1978.

THE INFRARED EMISSION OF THE GALACTIC CENTER. G. H. Rieke, C. M. Telesco y D. A. Harper en *The Astrophysical Journal,* vol. 220, n.º 2, parte 1, págs. 556-567; 1 de marzo de 1978.

LOS ORIGENES DEL PRIMER AVION MOTOPROPULSADO CON PILOTO A BORDO

THE PAPERS OF WILBUR AND ORVILLE WRIGHT. Dirigido por Marvin W. McFarland. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1953.

SIR GEORGE CAYLEY, INVENTOR OF THE AEROPLANE. John L. Pritchard. Horizon Press, 1962.

THE INVENTION OF THE AEROPLANE 1799-1909. Charles H. Gibbs-Smith. Faber and Faber, 1966.

WILBUR AND ORVILLE WRIGHT: A CHRONOLOGY COMMEMORATING THE HUNDREDTH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF ORVILLE WRIGHT, AUGUST 19, 1871. Arthur G. Renstrom. U.S. Library of Congress, Science and Technology Division, 1975.

COMPARTIMENTOS EN EL DESARROLLO DE LOS ANIMALES

COMPARTMENTS AND POLYCLONES IN INSECT DEVELOPMENT. F. H. C. Crick y P. A. Lawrence en *Science,* vol. 189, n.º 4200, págs. 340-347; 1 de agosto de 1975.

COMPARTMENTS IN THE WING OF *DROSOPHILA*: A STUDY OF THE *ENGRAILED* GENE. P. A. Lawrence y G. Morata en *Developmental Biology,* vol. 50, n.º 2, págs. 321-337; junio, 1976.

HOMOEOTIC GENES, COMPARTMENTS AND CELL DETERMINATION IN *DROSOPHILA.* G. Morata y Peter A. Lawrence en *Nature,* vol. 265, n.º 5591, págs. 211-216; 20 de enero de 1977.

HOMOEOTIC AND ATAVIC MUTATIONS IN INSECTS. A. García-Bellido en *American Zoologist,* vol. 17, n.º 3, págs. 613-629; verano, 1977.

EL MODELO EN BOLSA DEL CONFINAMIENTO DE LOS QUARKS

MASSES AND OTHER PARAMETERS OF THE LIGHT HADRONS. T. DeGrand, R. L. Jaffe, K. Johnson y J. Kiskis en *Physical Review, D.,* vol. 12, n.º 7, págs. 2060-2076; octubre, 1975.

STRINGLIKE SOLUTIONS OF THE BAG MODEL. K. Johnson y C. B. Thorn en *Physical Review D.,* vol. 13, n.º 7, págs. 1934-1939; 1 de abril de 1976.

QUARK CONFINEMENT R. L. Jaffe en *Nature,* vol. 268, n.º 5617, págs 201-208; 21 de julio de 1977.

LOS ANIMALES DE BURGESS SHALE

THE ENIGMATIC ANIMAL *OPABINIA REGALIS,* MIDDLE CAMBRIAN, BURGESS SHALE, BRITISH COLUMBIA. H. B. Whittington en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London,* serie B, vol. 271, págs. 1-43; 26 de junio de 1975.

FOSSIL PRIAPULID WORMS. Simon Conway Morris en *Special Papers in Paleontology,* n.º 20. The Paleontological Association of London; diciembre, 1977.

THE BURGESS SHALE (MIDDLE CAMBRIAN) FAUNA. Simon Conway Morris en *Annual Review of Ecology and Systematics,* en prensa.

FREGE

ESTUDIO DE LOS FUNDAMENTOS DE LA ARITMETICA DE FREGE. (Apéndice de Frege. Fundamentos de la Aritmética.) Cl. Imbert. Ed. Laia, 1972. Versión de Ulises Moulines.

EL DESARROLLO DE LA LOGICA. W. y M. Kneale. Ed. Tecnos, 1972. Tradn. de Javier Muguerza.

SENTIDO Y REFERENCIA EN LA LOGICA DE GOTTLOB FREGE. Christian Thiel. Ed. Tecnos, 1972. Tradn. de José Sanmartín.

JUEGOS MATEMATICOS

GÖDEL'S PROOF. Ernest Nagel y James R. Newman. New York University Press. 1958.

THE BACH READER: A LIFE OF JOHANN SEBASTIAN BACH IN LETTERS AND DOCUMENTS. Dirigido por Hans T. David y Arthur Mendel. W. W. Norton & Co., 1966.

SEMANTIC INFORMATION PROCESSING. Dirigido por Marvin L. Minsky. The MIT Press, 1968.

TALLER Y LABORATORIO

ELEMENTARY SEISMOLOGY. Charles F. Richter. W. H. Freeman and Co., 1958.

EARTHQUAKE INTERPRETATIONS. Ruth S. Simon. Colorado School of Mines, 1969.

AN INTRODUCTION TO SEISMOLOGY. Markus Bath. John Wiley & Sons, Inc., 1973.

Taller y laboratorio

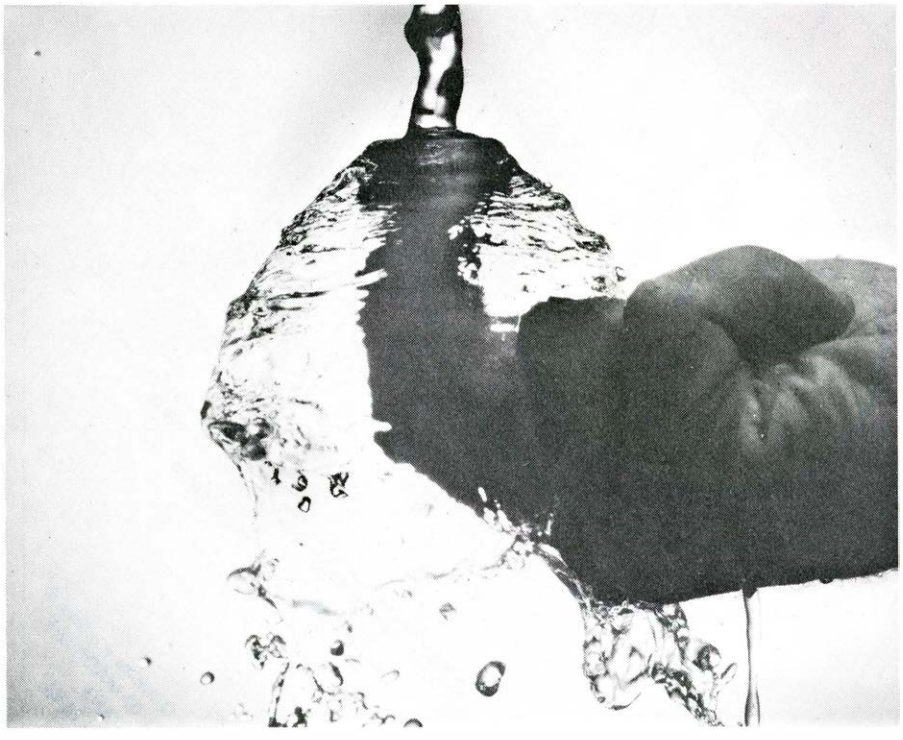
Cómo hacer campanas y cortinas de agua con cuchillos, cucharas y otros utensilios

Jearl Walker

Uno de los pocos placeres que encuentro en el enojoso trabajo de lavar los platos es hacer finas películas de agua, que en algunos sitios se les ha dado en llamar campanas o cortinas de agua. Si mantenemos la parte plana de un cuchillo perpendicular a la corriente de agua, podremos lanzar hacia fuera, por uno y otro lado de la hoja, delgadas cortinas de agua con sólo ajustar el caudal de flujo y la distancia entre cuchillo y grifo. En determinadas condiciones, las cortinas de agua se pliegan hacia atrás sobre sí mismas, formando unas hermosas superficies curvadas.

Con cucharas y otros cubiertos planos o ligeramente curvos, pueden crearse también cortinas e incluso otras figuras. Cualquier pequeño obstáculo circular puede utilizarse para lanzar hacia fuera cortinas que luego se pliegan sobre sí mismas originando formas simétricas abombadas: las campanas de agua. A veces, las cortinas de agua de ciertas fuentes son tan grandes que bien pudiera llamárselas esculturas de agua. Aunque también influyen otros factores en la forma que adopten las cortinas, se debe sobre todo a la tensión superficial el que se mantengan unidas contra las fuerzas desintegradoras. Tensión superficial que, además, las pliega sobre sí mismas para formar las campanas.

En mi opinión, el procedimiento más sencillo para lograr esas campanas es el que se sirve del tapón de rosca de una botella de bebida no alcohólica. La superficie plana de la parte superior suele tener el tamaño correcto para conseguir una buena campana; puede sujetarse fácilmente introduciendo dos dedos por el fondo del tapón. Para no destruir la campana con la mano, hay que colocar el tapón a la distancia adecuada del grifo introduciéndolo por abajo. Las cortinas de agua se pliegan hacia atrás sobre el antebrazo formando grandes campanas.



Campana de agua hecha con un tapón de botella

Pueden formarse cortinas a partir de corrientes de agua proyectadas hacia arriba, como sucede en muchas fuentes públicas. Un pequeño obstáculo situado en una corriente puede lanzar la cortina de agua hacia los lados, hacia arriba o hacia abajo según la geometría del obstáculo. Podemos crear una campana de agua con una corriente hacia arriba o con una corriente hacia abajo, siempre que se ajuste la velocidad a la que el agua choca contra el obstáculo, si bien la forma de la campana quizá no sea siempre la misma. Si el obstáculo tiene una superficie cóncava, las cortinas de agua se dirigen hacia abajo originando una campana de casi la misma configuración que muestran las que surgen instalando el objeto debajo del grifo. Si el obstáculo tiene su superficie convexa, las cortinas de agua se dirigen inicialmente hacia arriba, luego se curvan y caen hacia abajo. La campana presentará una parte superior más aplastada que las habituales formas redondeadas por arriba observadas en el fregadero.

Las cortinas de agua han venido siendo objeto de atención, por lo menos, desde 1833, en que aparece el primer estudio firmado por Félix Savart. En 1935 se conocía ya la mayoría de los principales determinantes de la forma de las cortinas y campanas, aunque tal vez no en detalle debido a la dificultad que entrañan sus cálculos matemáticos. En los últimos veinte años, el interés por las cortinas de agua ha crecido, instado por la necesidad de controlar las capas de fluido surgida en algunos campos, como por ejemplo el de la pintura con spray. El proceso por el cual una delgada película de líquido se rompe formando gotitas es de importancia particular. El radio máximo de una cortina está básicamente determinado por la tensión superficial del agua. La cortina se desvanece al alcanzar un radio para el que la tensión superficial no es capaz de mantener la película de líquido unida, a pesar del empuje hacia fuera que induce el movimiento del agua, es decir, a pesar de la fuerza de inercia del líquido en su flujo radial desde el punto de impacto con el obstáculo encontrado en la corriente.

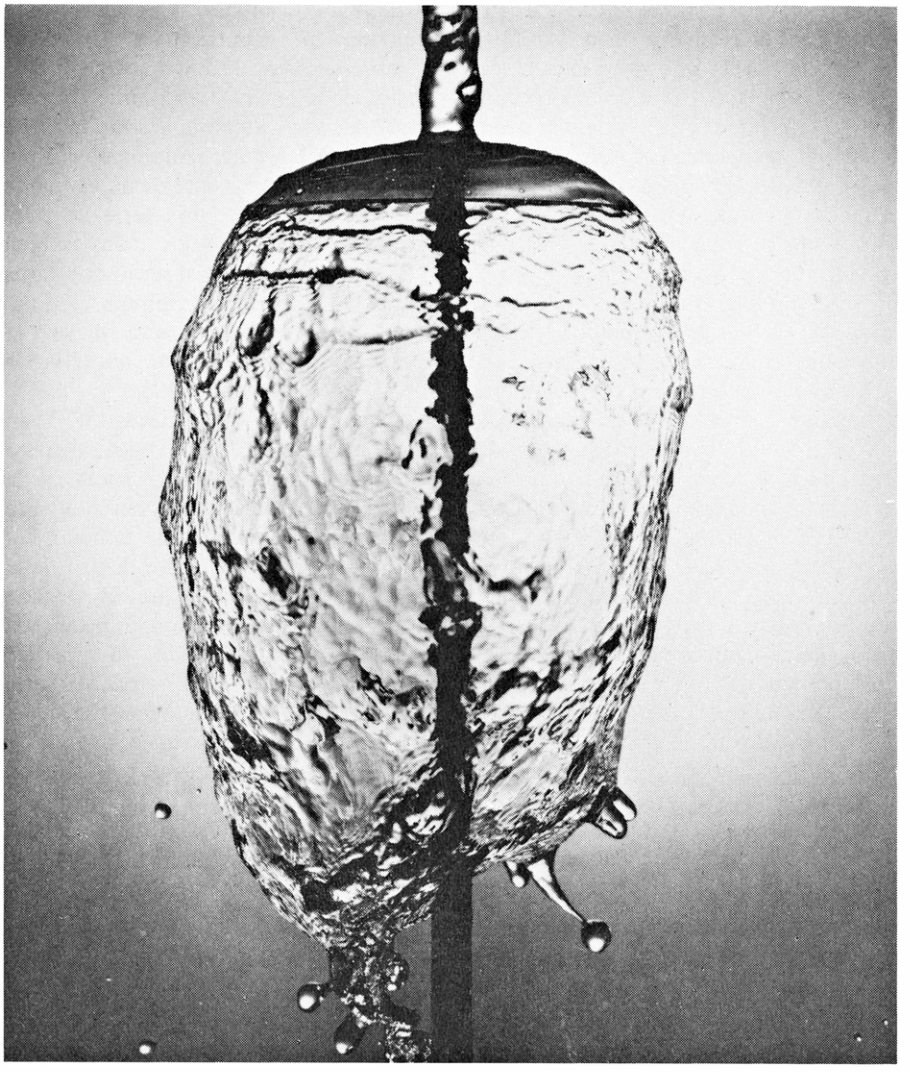
Además del tapón de botella, los objetos que mejor me han servido de obstáculos en mis trabajos con las campanas de agua han sido el fondo plano de un recipiente de plástico de 20 milímetros y un cristal de reloj de unos seis centímetros de diámetro. El recipiente era lo suficientemente grande como para poder sujetarlo con los dedos sin que el brazo entorpeciera el desarrollo de las cortinas de agua. Por el contrario, con el cristal de reloj, si bien

servía como superficie curvada de experimentación, los dedos obstruían siempre las cortinas de agua.

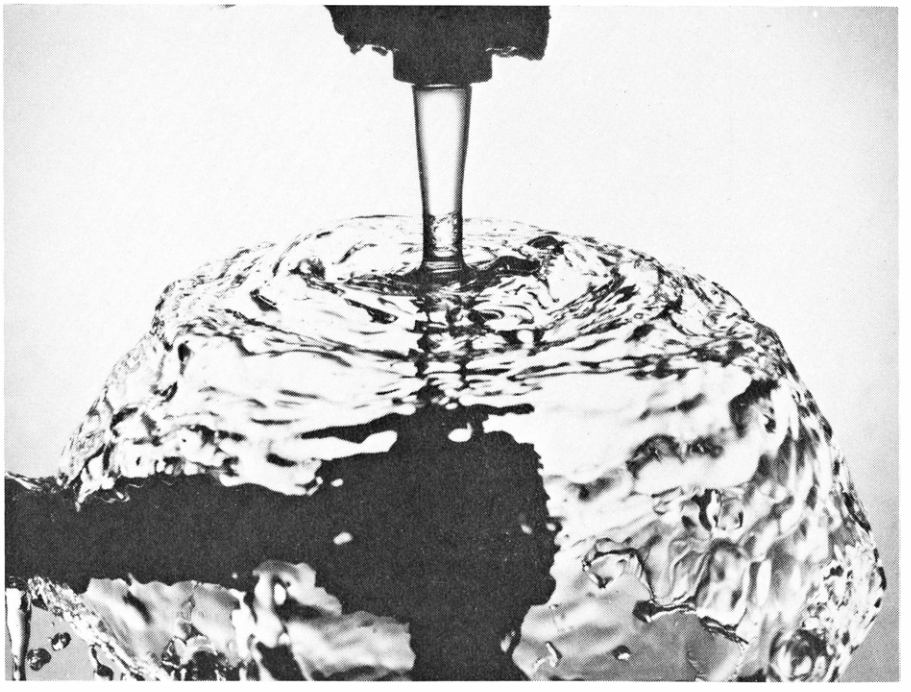
Me entretuve primero con una corriente normal de agua descendente, creando grandes cortinas y campanas de agua que, en no pocas ocasiones, terminaban en mi camisa y en el suelo de la cocina. Cuando el chorro era bastante intenso, las cortinas formadas con el recipiente derivaban hacia los lados con una cantidad de movimiento tal que alcanzaban el radio de desintegración antes de que pudieran curvarse. Con menor velocidad de impacto, las cortinas se curvaban antes de desintegrarse. A una velocidad alta obtuve cortinas casi horizontales, mientras que a velocidades más bajas conseguía campanas casi perfectas. El cristal del reloj no me permitió tales filigranas. El lado cóncavo producía una breve cortina de agua que duraba muy poco debido a la turbulencia. El lado convexo enviaba el agua inicialmente hacia abajo, posibilitando cortinas mejores.

Para obtener una corriente hacia arriba, incorporé un trozo de manguera al grifo. Levanté el extremo libre de la misma y lo fijé con una abrazadera unida a un anillo soporte. Esta disposición tenía la ventaja de producir las cortinas de agua cerca de la taza del fregadero, lo que disminuía la probabilidad de que me mojara y salpicase la cocina. El recipiente formaba grandes cortinas y campanas de agua, a tenor de cómo ajustaba la velocidad del flujo y a qué distancia del extremo abierto de la manguera estaba el fondo del recipiente. El lado cóncavo del cristal del reloj daba resultados similares. El lado convexo enviaba la cortina hacia arriba. Ajustando la velocidad del flujo, podía variarse la forma de las cortinas, así como hacer que se curvaran por la parte de arriba hasta alcanzar una altura máxima a partir de la cual comenzaban a caer. El cambio de dirección podía ser suave y gradual o bien cortante y radical. Cuando interpuse un tenedor en una corriente ascendente, se formaron varias cortinas de agua, una por cada espacio entre dientes, orientadas cada una de ellas en una dirección distinta. Además, la porción de flujo que chocaba contra la sección cóncava del tenedor producía parte de una campana de agua. El efecto combinado resultaba hermoso y fascinante.

En 1935, Frank L. Hopwood presentó una buena descripción de las campanas de agua, donde estudiaba las diferentes formas según las distintas velocidades de flujo. Hopwood construyó sus campanas haciendo pasar el agua a través de un



Campana creada con un cristal de reloj



Cortinas formadas por la colisión coaxial de dos chorros

tubo de latón de unos 10 centímetros de largo y unos 2,1 centímetros de diámetro exterior. Coaxialmente con el tubo, había una varilla que sobresalía por la cabeza del mismo, llevando incorporado en esa zona un pequeño cilindro o una tuerca. El agua subía por entre la varilla y las paredes del tubo y salía por la estrecha abertura existente entre el extremo superior del tubo y el obstáculo situado en la varilla. Enroscando o desenroscando el cilindro o la tuerca a lo largo de la varilla, Hopwood podía ajustar el tamaño de la abertura.

El tubo estaba montado verticalmente en un gran recipiente que recogía el agua que caía. Una tubería servía de rebosadero para evacuar el agua, antes de rebosar, a un fregadero próximo. Controlaba la corriente de agua con una llave de paso. Con este montaje, las campanas de agua de Hopwood se unían con la superficie del agua del recipiente produciendo campanas cerradas.

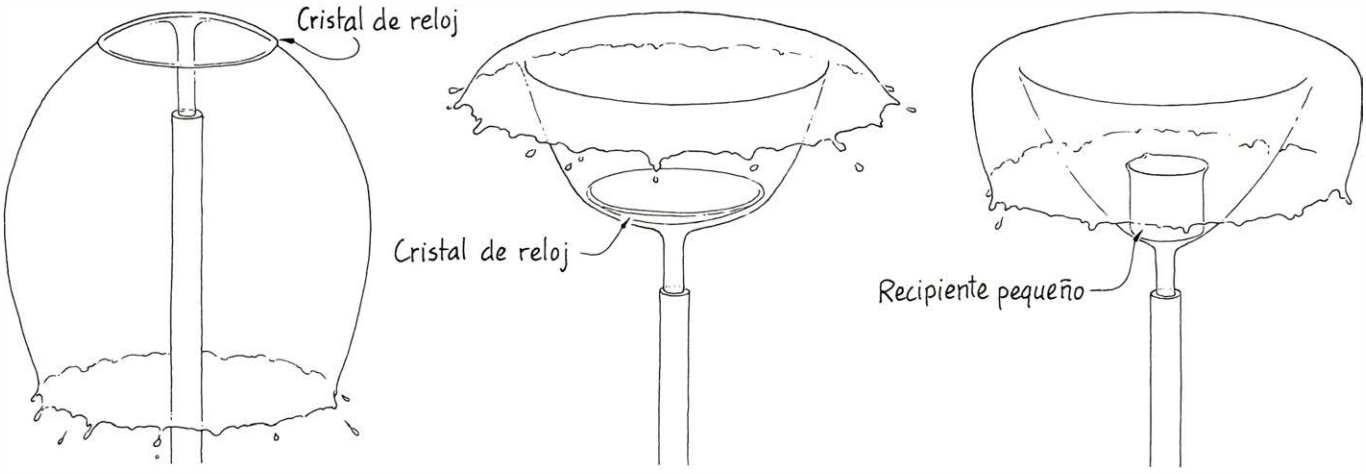
Hopwood obtuvo campanas con la bóveda redondeada y con la bóveda plana, según ajustaba la altura del obstáculo sobre el nivel del agua del recipiente, la anchura de la abertura y el caudal de agua. Algunas de las campanas obtenidas con la parte superior plana tenían los lados curvados hacia el centro, mientras que los de otras eran rectos, aunque inclinados. En ciertos casos, el borde de la zona del cambio de dirección se distinguía con nitidez. A veces el borde formaba un montículo y Hopwood observó pequeñas gotas que salían despedidas por encima del borde. Cuando construía una campana grande, y luego comenzaba a reducir lentamente el flujo de agua, observaba que dicha campana iba generando toda una serie de estas figuras estables (con los lados o bien rectos o bien cóncavos) junto con otras inestables conforme disminuía el flujo. Una vez que éste llegara a ser lo suficientemente pequeño, adquiría la forma de un cilindro vertical.

Cuando Hopwood aumentó el tamaño de la campana de agua, penetró con uno de sus dedos la pared de la campana y se encontró con que ésta dobló inmediatamente su tamaño. Al parecer, la presión del aire dentro de la campana era menor que la presión atmosférica existente fuera. Si penetraba la pared mientras hacía decrecer el caudal de agua y el tamaño de la campana, resultaba una ligera reducción del tamaño de la misma, lo que implicaba que las condiciones de presión eran diferentes.

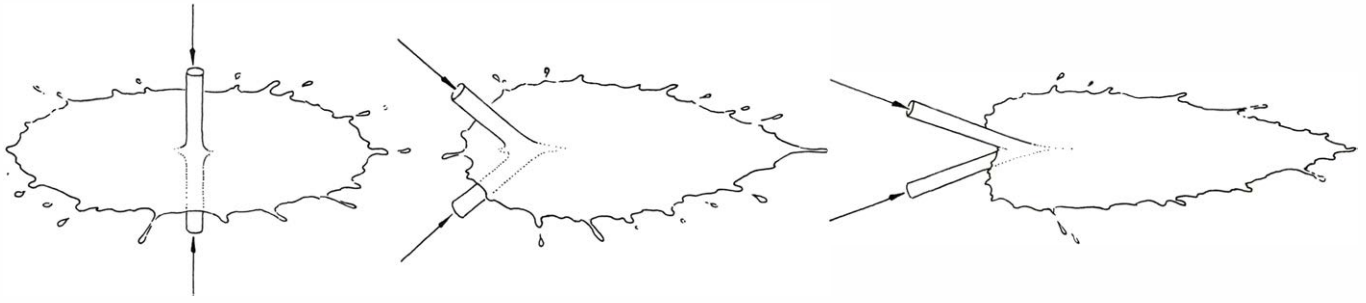
Para proseguir sus investigaciones sobre la presión del aire dentro de la campana, Hopwood inyectó poco a poco burbujas en su interior, introduciéndolas a través del agua del recipiente hasta alcanzar el centro de la campana. Si la campana era al principio redonda y ligeramente curvada, la presión extra dentro de ella incrementaba el diámetro de la base; al tiempo que disminuía el diámetro de la parte superior. Se empezaron a curvar los lados hacia dentro, comenzaba a formarse un borde en la parte superior y, a veces, aparecía un pliegue o zanja a lo largo del perímetro cerca de la base. Estos cambios continuaban hasta que el exceso de presión en el interior era tal que hacía salir el aire por la abertura de la base; entonces, la campana se encogía hasta volver a tener su forma original.

Se pueden conseguir resultados similares introduciendo una pajita flexible a través del agua del recipiente hasta el interior de la campana y soplando luego poco a poco por ella. Podría sustituirse dicha pajita por un tubito de goma flexible con una perilla en el extremo. Con uno u otro sistema pueden investigarse también los cambios que se producen al extraer aire del interior de la campana. ¿Acaso una campana con la bóveda redondeada se deshincharía de un modo regular, sin mostrar ningún otro cambio en su forma?

Hopwood sugiere que se pueden conseguir dos campanas, una dentro de la otra, con dos tubos abiertos colocados sobre un mismo eje, pero con suministro



Ejemplos de cortinas de agua formadas con una corriente invertida



Formas de cortinas generadas por dos corrientes de agua en colisión

de agua independientes. Yo mismo hice dos campanas de agua incompletas de forma más sencilla empleando el cristal curvo del reloj. Conecté el tubo del grifo a otro tubo en forma de *Y*. Uní un brazo de la *Y* a una tubería que mantuve vertical sujetándola a un anillo soporte con una abrazadera; conecté el otro a otra tubería, que monté de forma similar sobre el anillo soporte, pero en una posición superior y mirando hacia abajo. Coloqué unas abrazaderas en cada una de las mangueras, de manera que pudiera controlar la cantidad de agua que circulaba por cada una de ellas. Cuando abrí el paso del agua, introduje el cristal del reloj en la corriente. Podía ajustar el flujo de agua en cada tubería, la distancia entre orificios y la distancia entre el obstáculo y cada uno de los orificios.

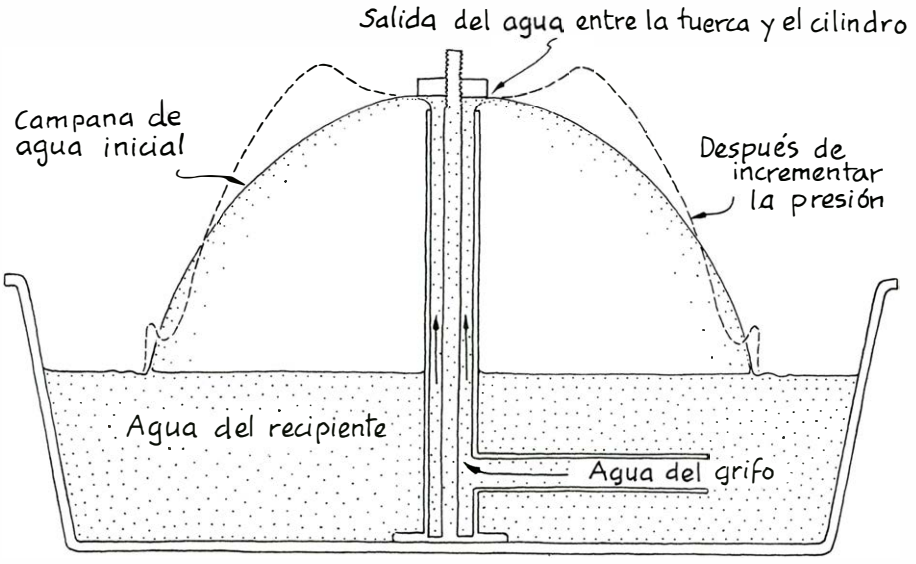
Tanto la superficie superior como la inferior del cristal del reloj producían cortinas de agua. Normalmente, las cortinas se mezclaban en el borde del cristal. Con un poco de paciencia, logré que la parte superior cóncava produjera una cortina de agua por encima que no afectaba ni era afectada por la cortina que la parte inferior convexa enviaba hacia abajo. Excepto por la región por donde sujetaba el cristal, obtuve dos campanas de agua independientes una de la otra.

Al inclinar el cristal del reloj, las dos cortinas de agua entraron en contacto y se fusionaron. Separarlas de nuevo me costó trabajo, pues la tensión superficial tendía a mantenerlas unidas. A veces conseguía separar las hojas sólo en una pequeña zona en una de las caras del cristal. Quizá se debiera ello a que entre las dos cortinas quedaba atrapada una capa de aire. Podían formarse así grandes y hermosas distorsiones de las cortinas de agua, con suaves curvas hacia arriba y hacia abajo. Sustituí el cristal del reloj por un tenedor y encontré distorsiones similares de múltiples cortinas, dondequiera que ellas se mezclaban.

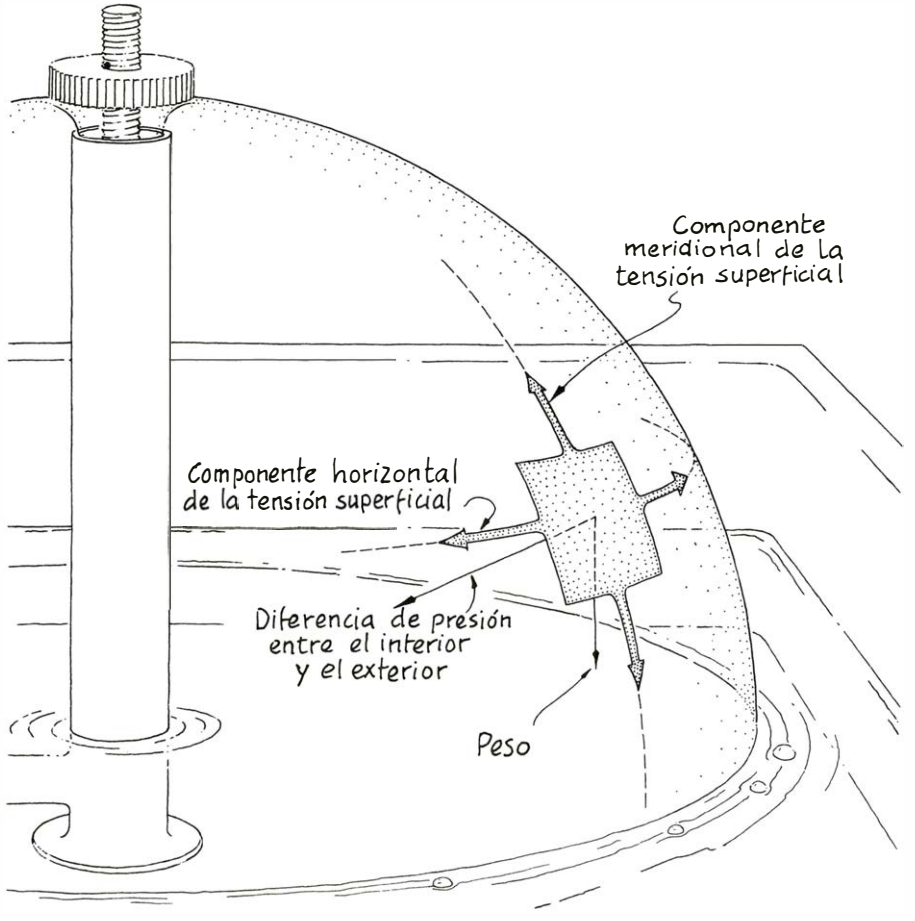
La forma de una campana está determinada por la diferencia de presión entre el interior y el exterior, por la gravedad, la viscosidad del aire en el interior de la campana y la tensión superficial. El efecto de la tensión superficial es doble: una fuerza hacia arriba y hacia abajo a lo largo del meridiano de la campana y una fuerza horizontal a lo largo de la circunferencia. Si la campana fuera esférica, las dos tensiones serían iguales, pero los diferentes radios de curvatura, según la dirección horizontal y la dirección meridional, hacen que dichos esfuerzos sean diferentes.

Si el lector investiga las cortinas y las campanas de agua esporádica o sistemáticamente, puede estar seguro que se divertirá bastante con ellas. También puede buscar nuevos moldes con los que generar figuras o bien crear esculturas de agua con múltiples campanas mezcladas unas con otras. Hay incluso otro camino para obtener cortinas de agua curvadas consistente en hacer caer agua por un borde como si fuera una cascada. También puede obtenerse una figura parecida a una campana vertiendo agua por las paredes de un cilindro vertical, de manera que la cortina que cae por la parte inferior del cilindro se una en un punto por debajo del mismo.

Si el lector fotografía las campanas de agua hechas en su fregadero, hallará que la cámara descubre muchas más turbulencias de las que se ven a simple vista. El único camino para eliminar este in-



Cambios en la forma de una campana de agua al incrementar la presión interior



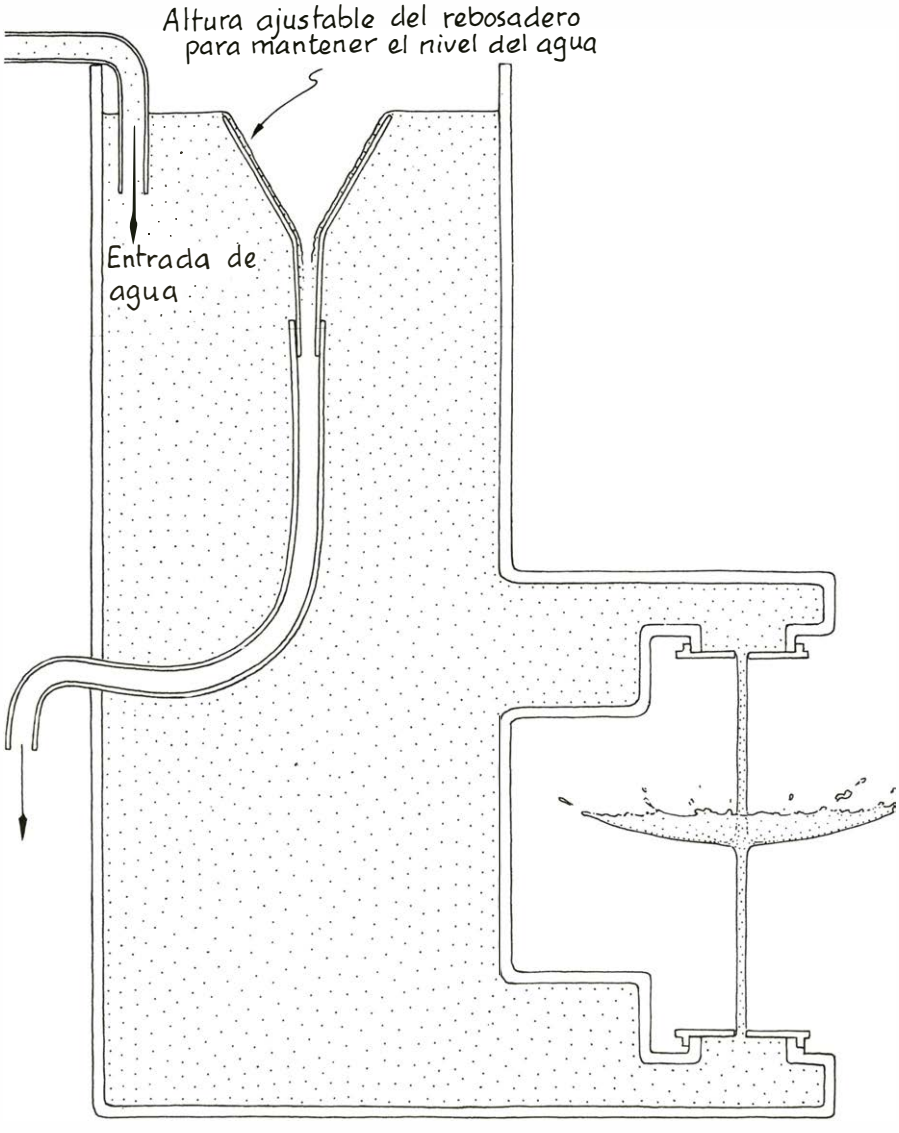
Fuerzas que actúan sobre una zona de la superficie de una campana de agua

conveniente es hacer pasar primero el agua a través de un número de delgados y estrechos tubos y también por varias hojas de cedales de alambre.

Las cortinas y campanas de agua pueden obtenerse también haciendo chocar dos chorros laminares de agua, bien de frente o bien inclinados. Bajo condiciones correctas, el agua se esparce formando una cortina que puede ser o bien plana (fuera del radio de desintegración) o bien curva. Ajustando el flujo y el diámetro de cada una de las corrientes, puede forzarse la curvatura en una determinada dirección: la cortina se curva hacia fuera de la corriente que lleva más cantidad de movimiento. Las cortinas casi planas aparecen cuando las cantidades de movimiento de ambas corrientes son las mismas. A una determinada diferencia entre los momentos, la cortina se pliega hacia atrás sobre uno de los chorros y origina una campana.

Se ha venido empleando para la construcción de cortinas este método desde que Savart escribiera por vez primera acerca de las campanas de agua. Calculó que el diámetro de las cortinas o de las campanas es proporcional a la presión del agua en las corrientes y proporcional, asimismo, al cuadrado del diámetro de las dos aberturas por donde sale el chorro. Las mediciones experimentales mostraron que el radio de desintegración coincidía con el calculado por Félix Savart.

J. H. Lienhard y J. C. P. Huang realizaron amplios estudios sobre choques de corrientes de agua en los años sesenta. Utilizaron un gran recipiente de agua de unos cincuenta centímetros de hondo para producir las dos corrientes. La profundidad podía ajustarse por un mecanismo de rebose que mantenía constante el nivel del agua. Dos salidas en la pared del recipiente llevaban incorporados dos tubos perpendiculares a dicha pared. Con gran precisión, se taladró un agujero en cada uno de los tubos de manera que cuando se llenaba de agua el recipiente, salían unos chorros de los agujeros en direcciones encontradas. El montaje, estable, tenía la ventaja de poder controlar la velocidad de las corrientes muy fácilmente ajustando la altura del agua en el recipiente. Los agujeros se reemplazaban fácilmente por otros agujeros con otros diámetros.



Aparato para producir chorros de agua que colisionen

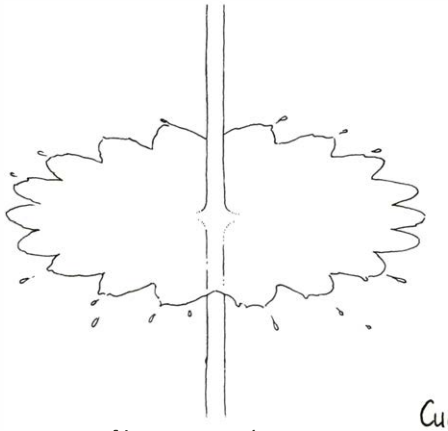
Las cortinas de agua pueden hacerse con menor dificultad, aunque se resiente el dominio del sistema. En éste, el agua viene desde el grifo a través de un distribuidor en *Y*, que enfrenta luego las dos corrientes, una en dirección a la otra. Si bien el montaje no permite modificar el diámetro del flujo, a no ser que cambiase las mangueras, sí puedo controlar la velocidad de la corriente por medio de las abrazaderas. Con este sistema, resulta casi un juego construir campanas de agua.

Por lo que se refiere a las cortinas, el rasgo que encierra mayor interés para los investigadores es su proceso de desintegración por los bordes. El trabajo más sobresaliente realizado sobre ese particular se debe a Lienhard y Huang, quienes experimentaron con cortinas formadas por dos corrientes en colisión. Algunos componentes de las desintegraciones sólo pueden verse en las fotografías tomadas a una gran velocidad o bien con películas, pero otros pueden verse en mis campanas de agua caseras.

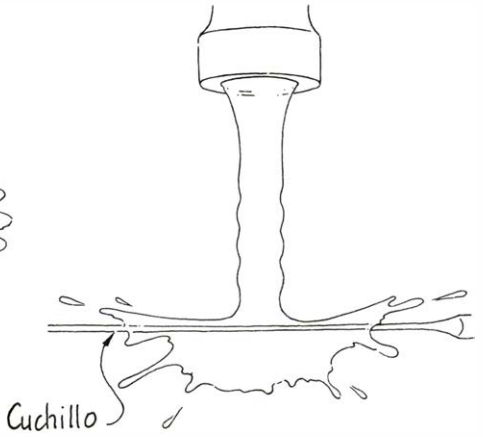
Lienhard y Huang investigaron la desintegración en base a un factor conocido como el número de Weber, número adimensional que se aplica en los estudios de dinámica de fluidos. Dicho número se calcula multiplicando tres cantidades –la densidad, el diámetro de la corriente de fluido y el cuadrado de su velocidad– y dividiendo el resultado por la tensión superficial. En general, sólo pueden variar la velocidad y el diámetro. En las cortinas de agua de mi cocina, la velocidad puede regularse con la válvula del flujo; y, como todo chorro se va estrechando al caer, se puede elegir el diámetro adecuado en cualquier punto a lo largo de la corriente.

Con un número de Weber bajo (valores en un rango de 100 a 500), las cortinas son estables y tienen un perímetro casi circular, formándose gotitas de agua a lo largo del perímetro. En las fotografías hechas con alta velocidad se puede ver que estas gotitas se mueven a lo largo del perímetro coalesciendo unas con otras, aumentando su volumen, hasta que acaban por desprenderse constituyendo ya una sola gota. Las gotitas mayores y las gotas gruesas pueden observarse sin ayuda de ninguna fotografía, pero el movimiento de las gotitas a lo largo del perímetro es demasiado rápido para ser percibido.

Con números de Weber un poco más altos (entre 500 y 3000) el perímetro de



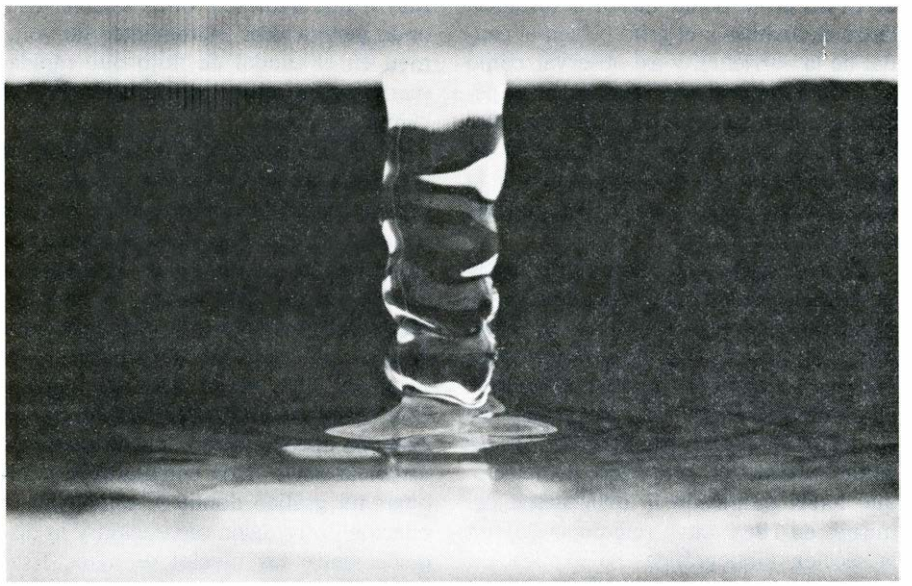
Una cortina de agua con un perímetro estrellado



Ondas en una corriente descendente

la cortina de agua adquiere una forma de estrella de muchas puntas, resultante de las ondas curvadas que se inician próximas al punto de colisión de las dos corrientes. Las ondas se propagan hacia fuera por la cortina dándole al perímetro una apariencia de brocado. Las cortinas con radio estable mayor se producen con un número de Weber entre 1000 y 2000. Próximo a 3000, los picos disminuyen y el perímetro se hace de nuevo circular. En tales condiciones puede verse cómo las ondas mayores se desplazan radialmente hacia fuera, desde el punto de colisión hasta el borde de la cortina. Estas ondas se llaman antisimétricas, debido a que el fluido en la cara opuesta de la cortina se mueve en dirección contraria, de suerte que en unos puntos de la onda la cortina pierde grosor y en otros gana. He podido mejorar la visibilidad de las ondas y de los picos del perímetro con números de Weber bajos, iluminando la cortina de agua con luz estroboscópica de alta frecuencia. Las ondas antisimétricas aumentan su amplitud con números de Weber mayores. La ruptura de los bordes puede observarse entonces sin dificultad porque la cortina empieza a flamear como si se tratara de una bandera que meciera el viento.

En mi montaje casero para conseguir corrientes que colisionen, cambiaba el ángulo de las corrientes al objeto de provocar colisiones más oblicuas. Cuanto menor era el ángulo bajo el que colisionaban las dos corrientes, tanto menor era la pieza de cortina que se formaba entre ambas y tanto mayor la porción que quedaba fuera del ángulo de las dos corrientes. (En la colisión, la mayor parte del agua sale despedida hacia dicha zona.) Cuando el ángulo entre las dos corrientes media, o se acercaba, a 60 grados, la cortina formada entre las dos corrientes era bastante menor que la que se formaba en la región exterior. La cor-



Ondas en una corriente descendente saliendo por un agujero abierto en un vaso de papel

tina mayor adquiría la figura de una hoja con la punta hacia fuera.

Volviendo a las cortinas de agua creadas por el choque de una corriente contra un obstáculo, he seguido de cerca las indicaciones de Sir Geoffrey Taylor (autor de varios trabajos sobre la dinámica de las cortinas de agua), quien introducía perturbaciones en el obstáculo. Tomé un cuchillo e hice un reborde radial en el fondo de un recipiente de plástico. Al servirme de éste para hacer cortinas de agua, con un número de Weber mediano, el reborde enviaba hacia fuera ondas curvas similares a las que se formaban, periféricamente, con un número de Weber similar.

Para proseguir los experimentos sobre cortinas formadas con obstáculos o con corrientes de colisión, convendrá profundizar en la correlación entre la velocidad del fluido y la formación de cortinas o bien su mecanismo de ruptura, necesitando para ello contar con un suministro de fluido cuya presión pueda controlarse, como hicieron Lienhard y Huang. También puede investigarse con otros fluidos distintos del agua. Algunos fluidos no newtonianos, como los que describimos en esta sección en enero de 1979, pueden resultar de particular interés, aunque deben evitarse los viscosos, ya que no se desplazarán según las exigencias requeridas para la formación de cortinas.

Hace unos siete años, la investigadora Elizabeth Wood (conocida por sus trabajos sobre los cristales y por su encantador libro *Sciencie for the Airplane Passanger*) me habló sobre otro fenómeno común de fregadero. Si mantenía el grifo abierto con un chorro tenue, de suerte que el agua fluyera lentamente, y con una hoja de cuchillo en la corriente cerca del grifo, podía ajustar la distancia entre el cuchillo y el grifo o bien el caudal de la corriente, y así observar cómo se producían ondas o rizos sobre el pequeño tramo de corriente existente entre el grifo y el cuchillo. La longitud de onda de los rizos u ondas dependía de la velocidad del agua y de la longitud del tramo de corriente.

Durante estos siete años, y de forma un tanto esporádica, he buscado una explicación para el fenómeno de estas ondas o rizos. La respuesta, finalmente, me vino sugerida por Lienhard mientras charlábamos sobre las campanas de agua para preparar este artículo. De repente recordó, a propósito del efecto, que había publicado la explicación del mismo en 1968, cuya referencia doy en la sección bibliográfica. La explicación contradice los trabajos hechos por Lord Rayleigh en 1878 y 1879 sobre la propagación de las ondas a lo largo de los cilindros de líquido. En la corriente descendente de agua pueden verse las ondas generadas por el impacto de la corriente con el cuchillo. Se mueven hacia arriba a lo largo de la corriente, con la velocidad a que desciende el agua de la corriente, lo que justifica la impresión de que las ondas no se muevan.

Para investigar esas ondas, Lienhard montó un recipiente lleno de agua que se vaciaba por un agujero central, en un vaso de martini lleno también de agua. El diámetro del agujero era de medio milímetro. La distancia de caída del agua era, a la vez, pequeña y constante, pero como el nivel de la misma en el recipiente disminuía lentamente, también la presión en el agujero y, por tanto, la velocidad del agua en la salida disminuían poco a poco.

Al decelerar la velocidad del agua de salida del recipiente, la correlación entre la velocidad de la corriente y la velocidad de las ondas indicaba que la longitud de onda de los rizos tenía que aumentar. La longitud de onda alcanzaba, por último, un límite superior. Rayleigh decía que la columna de agua sería inestable para cualquier onda con una longitud mayor que la circunferencia de la columna de agua. La mayor longitud de onda que puede darse en una onda estable en una corriente descendente es, pues, igual a la circunferencia de la columna. Cuando la velocidad del agua ha bajado tanto que resulta inestable, las ondas o rizos se rompen a veces en gotitas que salen disparadas sobrenadando la superficie del vaso de martini. La máxima inestabilidad se alcanza para una onda que tiene aproximadamente una longitud de onda igual a 4,5 veces el diámetro de la corriente. Constituye una longitud de onda más dilatada que la mayor que daba una onda estable. Esta onda genera tales incrementos de volumen en el caudal de flujo que rápidamente crece tanto que la corriente se rompe en gotas.

Si el lector dispone de una cámara con lente de aproximación puede fotografiar las ondas o rizos que se forman en una corriente que sale lentamente por el agujero de un recipiente. La longitud de onda de los rizos viene a ser inversamente proporcional a la distancia entre el nivel del agua en el recipiente y el nivel del agua en el vaso de martini. Con diversas fotografías hechas con la lente de aproximación, puede medir la distancia entre rizos consecutivos y dibujar un gráfico donde se establezca la relación entre dicha separación y la distancia entre los niveles de agua. Esto por lo menos es una buena manera de pasar menos aburrida una larga tarde de fin de semana.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes;

TESTS BACTERIANOS DE SUBSTANCIAS POTENCIALMENTE CANCERIGAS

METHODS FOR DETECTING CARCINOGENS AND MUTAGENS WITH THE SALMONELLA/MAMMALIAN-MICROSOME MUTAGENICITY TEST. Bruce N. Ames, Joyce McCann y Edith Yamasaki en *Mutation Research,* vol. 31, n.º 6, págs. 347-364; diciembre, 1975.

PROPHAGE λ INDUCTION IN *ESCHERICHIA COLI* K12 *ENVA UVRB:* A HIGHLY SENSITIVE TEST FOR POTENTIAL CARCINOGENS. Patrice Moreau, Adriana Bailone y Raymond Devoret en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 73, n.º 10, págs. 3700-3704; octubre, 1976.

ULTRAVIOLET MUTAGENESIS AND INDUCTIBLE DNA REPAIR IN *ESCHERICHIA COLI.* Evelyn M. Witkin en *Bacteriological Reviews,* vol. 40, n.º 4, págs. 869-907; diciembre, 1976.

PROGRESOS HACIA UN REACTOR DE FUSION TOKAMAK

TOKAMAK DEVICES. L. A. Artsimovich en *Nuclear Fusion,* vol. 12, n.º 2, págs. 215-252; marzo, 1972.

TOKAMAK RESEARCH. H. P. Furth en *Nuclear Fusion,* vol. 15, n.º 3, págs. 487-534; junio, 1975.

A PHYSICIST'S ABC ON PLASMA. L. A. Artsimovich. Mir Publishers, 1978.

RECENT PROGRESS IN TOKAMAK EXPERIMENTS. Masanori Murakami y Harold P. Eubank en *Physics Today,* vol. 32, n.º 5, págs. 25-32; mayo, 1979.

UNA ALDEA DE COLONOS PRENEOLITICOS A ORILLAS DEL EUFRATES

PAPERS IN ECONOMIC PREHISTORY. Dirigido por E. S. Higgs. Cambridge University Press, 1972.

FARMING IN PREHISTORY. Barbara Bender. St. Martin's Press, 1975.

THE EXCAVATION OF TELL ABU HUREYRA IN SYRIA: A PRELIMINARY REPORT. A. M. T. Moore en *Proceedings of the Prehistoric Society,* vol. 41, págs. 50-77; diciembre, 1975.

THE NEOLITHIC OF THE NEAR EAST. James Mellaart. Charles Scribner's Sons, Inc., 1976.

CORALES Y ARRECIFES CORALINOS

PROBLEMS OF GROWTH AND CALCIUM DEPOSITION IN REEF CORALS. T. Goreau en *Endeavor,* vol. 20, n.º 77, págs. 32-39; enero, 1961.

THE BIOLOGY OF CORAL REEFS. C. M. Yonge en *Advances in Marine Biology:* vol. 1, dirigido por F. S. Russel. Academic Press, 1963.

REEF CORALS: AUTOTROPHS OR HETEROTROPHS? Thomas F. Goreau, Nora I. Goreau y C. M. Yonge en *The Biological Bulletin,* vol. 141, n.º 2, págs. 247-260; octubre, 1971.

CORAL REEFS AND MOLLUSCS. C. M. Yonge en *The Royal Society of Edinburgh Transactions,* vol. 69, n.º 7, págs. 147-166; 1974.

SUPERNOVAS Y FORMACION DE ESTRELLAS

DARK NEBULAE, GLOBULES, AND PROTOSTARS. Bart J. Bok en *Publications of the Astronomical Society of the Pacific,* vol. 89, n.º 531, págs. 597-611; octubre, 1977.

OBSERVATIONAL EVIDENCE FOR SUPERNOVA-INDUCED STAR FORMATION: CANIS MAJOR R1. William Herbst y George E. Assousa en *The Astrophysical Journal,* vol. 217, n.º 2, parte 1, págs. 473-487; 15 de octubre de 1977.

PROTOSTARS AND PLANETS. Dirigido por T. Gehrels. University of Arizona Press, 1978.

PROBLEMAS FISICOS CON MUCHAS ESCALAS DE LONGITUD

CRITICAL PHENOMENA IN 3.99 DIMENSIONS. K. G. Wilson en *Physica,* vol. 73, n.º 1; págs. 119-128; abril, 1974.

THE RENORMALIZATION GROUP IN THE THEORY OF CRITICAL BEHAVIOR. Michael E. Fisher en *Reviews of Modern Physics,* vol. 46, n.º 4, págs. 597-616; octubre, 1974.

RENORMALIZATION GROUP: CRITICAL PHENOMENA AND THE KONDO PROBLEM. Kenneth G. Wilson en *Reviews of Modern Physics,* vol. 47, n.º 4, págs. 773-840; octubre, 1975.

INTRODUCTION TO THE RENORMALIZATION GROUP AND TO CRITICAL PHENOMENA. Pierre Pfeuty y Gérard Toulouse. John Wiley & Sons, 1977.

EL CONTROL HORMONAL DEL COMPORTAMIENTO EN UN LAGARTO

PSYCHOBIOLOGY OF REPTILIAN REPRODUCTION. David Crews en *Science,* vol. 189, n.º 4208, págs. 1059-1065; 26 de septiembre de 1975.

BIOLOGICAL DETERMINANTS OF SEXUAL BEHAVIOR. Dirigido por John B. Hutchinson. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

THE PARENTAL BEHAVIOR OF RING DOVES. Rae Silver en *American Scientist,* vol. 66, n.º 2, págs. 209-215; marzo-abril, 1978.

ENDOCRINE CONTROL OF REPTILIAN REPRODUCTIVE BEHAVIOR. D. Crews en *Endocrine Control of Sexual Behavior.* Dirigido por Carlos Beyer. Raven Press, 1979.

ATMOSFERA Y CONTAMINACION ATMOSFERICA

AIR POLLUTION. R. Scorer. Pergamon Press, Oxford, 1972

AIR POLLUTION. H. C. Perkins. McGraw-Hill Book Co., New York, 1974.

CLIMA Y TIEMPO. H. Flohn. Biblioteca para el Hombre Actual, n.º 37. Labor, Barcelona, 1977.

CONTAMINACION ATMOSFERICA: FUNDAMENTOS FISICOS Y QUIMICOS. J. H. Seinfeld. Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid, 1978.

JUEGOS MATEMATICOS

CONVERGENCE ON THE ARGAND DIAGRAM. L. W. H. Hull en *The Mathematical Gazette,* vol. 43, n.º 35, págs. 205-207; octubre, 1959.

COMPLEX NUMBERS IN GEOMETRY. I. M. Yaglom. Academic Press, 1968.

THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF COMPLEX NUMBERS. D. R. Green en *The Mathematical Gazette,* vol. 60, n.º 412 págs. 99-107; junio, 1976.

TALLER Y LABORATORIO

WATER BELLS. F. L. Hopwood en *The Proceedings of the Physical Society,* sección B, vol. 65, parte 1, n.º 385B, págs. 2-5; 1 de enero de 1952.

CAPILLARY ACTION IN SMALL JETS IMPINGING ON LIQUID SURFACES. John H. Lienhard en *Transactions of the American Society y of Mechanical Engineers, Series D. Journal of Basic Engineering,* vol. 90, págs. 137-138.

THE BREAK-UP OF AXISYMMETRIC LIQUID SHEETS. J. C. P. Huang en *Journal of Fluid Mechanics,* vol. 43, págs. 305-319; 28 de agosto de 1970.

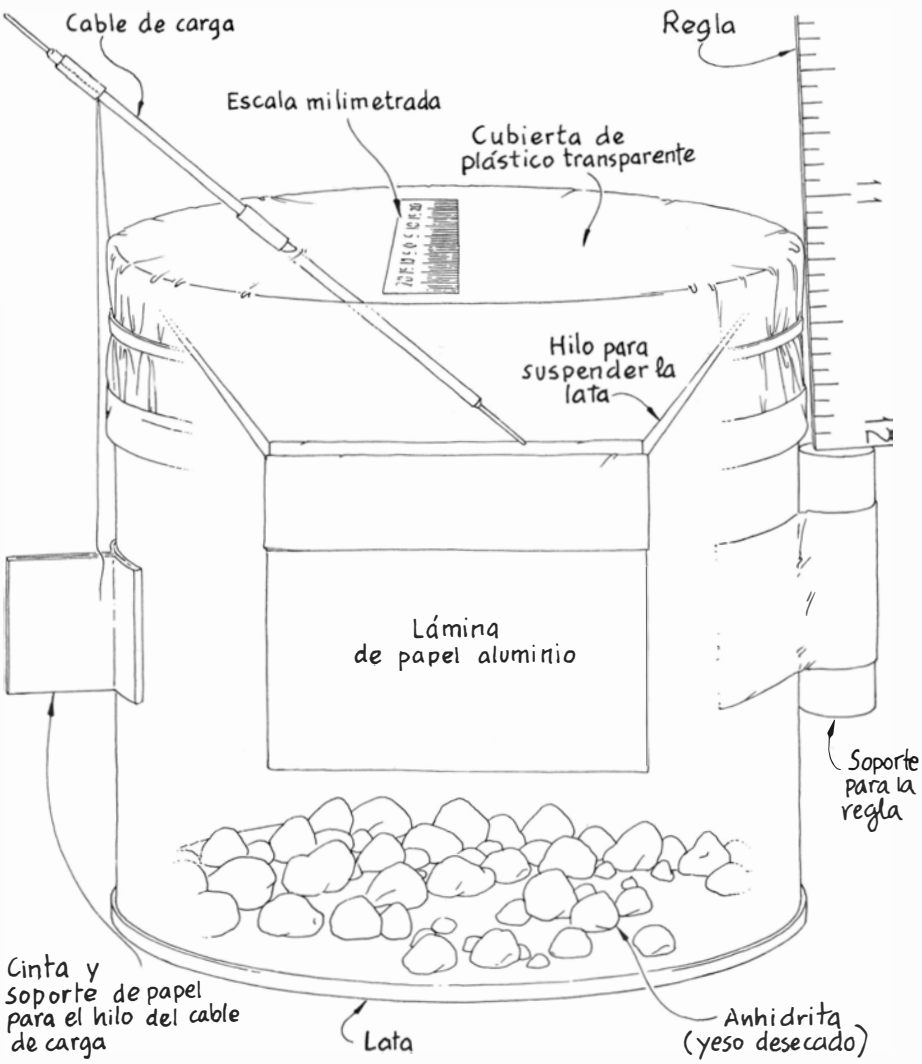
Taller y laboratorio

Detector de radiaciones hecho con dos láminas de aluminio y una lata

Jearl Walker

Quien quiera saber si la cantidad de radiación existente a su alrededor supera los niveles normales puede fabricarse, en un par de horas, un contador o medidor que le dé la respuesta. Ideado por Cresson H. Kearny, Paul R. Barnes, Conrad V. Chester y Margaret W. Cortner, del Oak Ridge National Laboratory, el aparato en cuestión puede construirse con materiales a nuestro alcance más inmediato. El contador trabaja de acuerdo con el principio del electroscopio, que dice que dos láminas metálicas de poco peso se alejan al cargarse eléctricamente con potenciales del mismo signo. A pesar de su simplicidad, el contador tiene una precisión del 25 por ciento en un rango de 0,03 a 43 roentgen. Además puede trabajar en un ambiente con el 100 por ciento de humedad, circunstancia que haría inoperantes a muchos electroscopios porque la humedad descargaría las láminas.

El contador Kearny es, en líneas generales, combinación de un electroscopio y un condensador. Consta de dos hojas metálicas suspendidas dentro de una caja, también metálica, por medio de hilo aislante. Se cargan las hojas con un potencial relativamente alto tocándolas con un plástico duro frotado previamente con un papel o bien con una cinta enrollada rápidamente. Al recibir las hojas cargas del mismo signo (positivas o negativas) se separan. En ayuda del proceso está el hecho de que, cuando las hojas se cargan, en la superficie interior del recipiente se desarrollan cargas de signo contrario; entonces, al tiempo que una hoja repele a la otra, se ve atraída por la superficie del recipiente.



Contador de radiación diseñado por Cresson H. Kearny y sus colaboradores

Al exponer el contador a radiaciones, se ioniza el aire de su interior (los átomos o moléculas del aire ganan o pierden electrones). Los iones se separan y se dirigen hacia las hojas metálicas o hacia la superficie interna del recipiente. Si las láminas se cargan positivamente, y negativamente la superficie del recipiente, los electrones y los iones negativos (átomos o moléculas que han ganado un electrón) producidos por la ionización se desplazan hacia las hojas, y los iones positivos (átomos o moléculas que han perdido un electrón) se dirigen hacia la superficie interior del recipiente. La acumulación de carga reduce la mutua repulsión entre hojas y la atracción entre cada hoja y la superficie interior.

En virtud de lo cual, las hojas tienden a encontrarse a una velocidad que depende de la cantidad de radiación que esté pasando a través del recipiente. Kearny y sus colegas han establecido una tabla para obtener, a partir de la velocidad a la que se mueven las hojas, la cantidad de radiación existente, expresada en roentgen por hora. El contador puede calibrarse con dicha tabla si su construcción se ajusta a determinadas dimensiones, de suerte que el peso de las hojas y el campo eléctrico entre las mismas y la pared del recipiente sean cantidades fijadas. Podemos comprobar el contador colocándolo en la vecindad de un aparato de rayos X de dentista o cualquier aparato usado en clínica radioterapéutica. El Oak Ridge National Laboratory ha publicado diversos modelos e instrucciones detalladas para la construcción de un contador Kearny, que pueden hallarse en la sección bibliográfica.

Aunque el contador está ideado para medir rayos gamma, cualquier otro tipo de radiación ionizante, como las partículas beta (electrones y positrones con alta velocidad), rayos X, neutrones o protones pueden determinarse con el mismo procedimiento.

Los rayos X y los rayos gamma son ondas electromagnéticas idénticas a las ondas de la luz visible en todo, excepto

en su mucha mayor frecuencia y energía. Es posible producir rayos X al arrancar un electrón de una órbita interior de un átomo, dando lugar a que otro electrón de una órbita exterior caiga a la órbita interna que había quedado vacía. La diferencia de energía entre ambos estados orbitales se emite en forma de rayos X. Más comúnmente, los rayos X son las radiaciones emitidas por una partícula cargada cuando sufre una brusca deceleración al chocar con otro objeto.

Los rayos gamma tienen generalmente mayor energía y frecuencia que los rayos X, si bien los dos tipos de radiaciones se solapan en cierto intervalo. Los rayos gamma se originan a partir de los cambios producidos en el estado energético de un núcleo, y no propiamente de los cambios energéticos de los electrones fuera del núcleo. Un cambio en el nivel de energía de un núcleo es mayor que un cambio de la energía de un electrón; por ello, cuando un núcleo emite energía como onda electromagnética (rayo gamma), la onda es más energética.

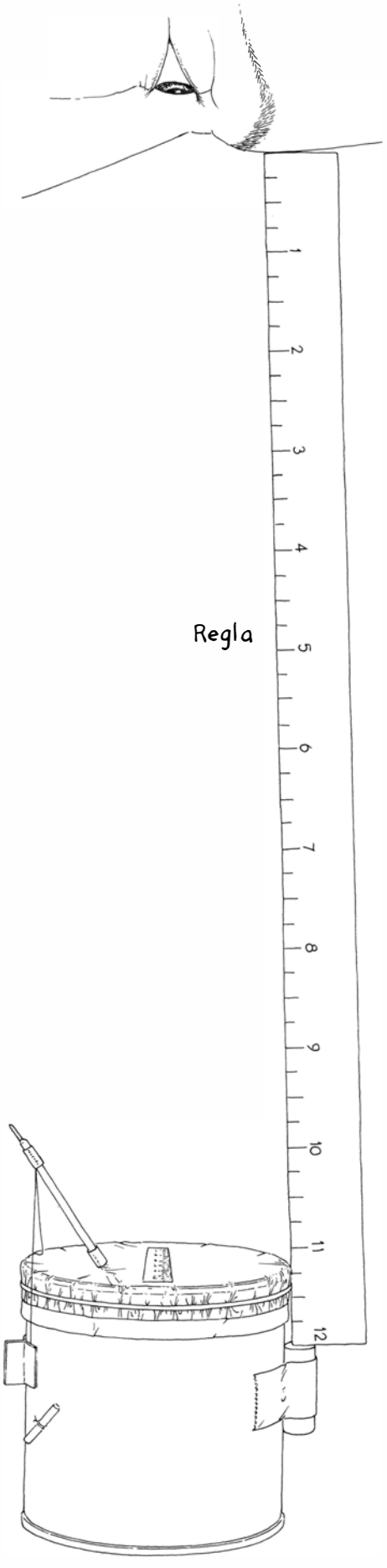
En su paso a través de la atmósfera del contador, los rayos gamma provocan la ionización de las moléculas del aire: suministran a los electrones la energía necesaria para que abandonen las moléculas. Las unidades para medir el nivel de radiación que produce una cantidad determinada de ionización pueden dar lugar a confusión, debido en particular a que se han cambiado con los años. Una de las primeras unidades, el roentgen (R), fue introducida sólo para medir los rayos X y gamma. Un roentgen de dicha radiación produce $2{,}08 \times 10^9$ pares de iones en un centímetro cúbico de aire en condiciones de presión y temperatura normales. Dado que sólo una fracción de las radiaciones es en realidad absorbida por las moléculas del aire, no está claro si un roentgen es la cantidad total de radiación presente en el haz o la cantidad realmente absorbida. Además, esta unidad tiene una utilidad limitada, pues no es aplicable a otros tipos de radiación que tengan efectos distintos sobre las moléculas, aparte de la mera ionización. Sin embargo, como el contador Kearny está ideado para medir el nivel de radiación correspondiente a los rayos gamma, sus lecturas se dan en roentgen por hora.

El rad es una unidad de radiación de aplicación universal. Mide la energía absorbida por un objeto irradiado. Un rad equivale a la absorción de 0,01 joule de energía por cada kilo de peso de objeto absorbente. El principal inconveniente de esta unidad es que no tiene en cuenta los efectos biológicos de dicha absorción, si el objeto expuesto es un cuerpo humano. Además, no distingue entre los varios tipos de radiaciones ni entre los diferentes efectos que pueden producirse en los tejidos vivos. Por ello, cuando los objetos irradiados son sistemas biológicos, la unidad común de medida es el rem (del inglés "roentgen equivalent man", equivalente humano del roentgen). A cada tipo de radiación distinto se le asigna un factor cualitativo que aproximadamente mide el daño biológico provocado por dicha radiación si se compara con el daño provocado por los rayos X o los rayos gamma. Por ejemplo, un rad de protones con menos de 10 millones de electronvolt de energía por protón provoca aproximadamente el mismo daño que 10 rad de rayos gamma: por tanto, se asigna a los protones un factor de calidad de 10. Si un ser humano se expone a una radiación de protones, la dosis de exposición en rem se calcula multiplicando el número de rad de la radiación por el factor de calidad; diez, en este caso hipotético.

Por definición, el factor de calidad de los rayos X y gamma es igual a 1, es decir: un rad de tales radiaciones equivale a 1 rem. Aunque la absorción de radiaciones puede variar ampliamente según se trate de un hueso o de un tejido blando, se puede hacer la aproximación de que un rad de rayos gamma es lo mismo que un roentgen. Por ello, la lectura del contador en roentgen por hora puede interpretarse como aproximadamente igual al número de rem por hora si se trata de rayos gamma.

¿Cuál es la gravedad de cierta dosis de radiación de rayos gamma? El informe del Oak Ridge da la siguiente norma orientativa. Si una persona sana recibe 100 roentgen repartidos a lo largo de dos semanas, una dosis adicional de otros 100 roentgen o más en un solo día es muy probable que no le cause trastorno alguno, a no ser que sufra otra gran exposición en las dos semanas siguientes. Si la exposición alcanza los 350 roentgen en un intervalo corto de días, hay una alta probabilidad de que la persona sufra alteraciones, pero puede evitarse su muerte aplicándole un tratamiento médico adecuado. Si la exposición alcanza los 600 roentgen en pocos días, la muerte del sujeto ocurrirá semanas más tarde. La radiación natural procedente de material radiactivo de la tierra y los edificios, así como la que tiene su fuente en los rayos cósmicos, se eleva a unos 200 milirrem por persona y año.

La cámara de ionización en el contador Kearny se construye con un



Relación entre el contador y los ojos

recipiente limpio de unos 240 centímetros cúbicos (con un diámetro interno de 6,5 centímetros y una altura de 7,3 centímetros), del que hemos quitado la parte superior para dejar un redondel bien recortado. Vale cualquier recipiente con un diámetro interior apropiado (una lata de cerveza, por ejemplo), pues sólo tendría que ser cortado para darle la altura adecuada. Usando el modelo que figura en la ilustración superior de esta página, puede dibujarse una especie de etiqueta para la lata a una escala adecuada y a continuación pegarla o sujetarla a la superficie de la misma, de forma que el borde inferior de la etiqueta coincida con el borde inferior de la lata. Si la etiqueta resulta un poco grande, recórtese por el borde inferior, no por la parte de arriba.

Se montará luego el recipiente en un soporte de madera que tenga aproximadamente su mismo diámetro; con un clavo afilado y un martillo pequeño abriremos cuatro agujeros en el recipiente, allí donde indique la etiqueta. Sirviéndonos de una aguja, doblaremos hacia atrás los rebordes metálicos de los agujeros, de suerte que queden alisados. A continuación, introduciremos el hilo por los agujeros en la forma indicada en la ilustración inferior de esta misma página. Procúrese tocar el hilo sólo por los extremos, pues tiene que permanecer absolutamente limpio. En cada extremo se atará un pasador, hecho con un palito. Luego, se tensará el hilo tirando de uno de los pasadores hacia abajo por un lado del recipiente dejándolo fijo en la posición adecuada; rellenaremos con cinta los agujeros para dejar el hilo en una posición fija y evitar la entrada y salida de aire en la cámara.

El hilo actuará de tope, evitando que las hojas de metal, en su oscilación, se acerquen demasiado a la pared del recipiente, no sólo cuando se encuentren cargadas, sino también al mover el contador. Si el hilo llegara a ensuciarse, se haría conductor y distorsionaría el campo eléctrico entre la hoja y el recipiente. Basta la leve contaminación de los dedos para estropear el calibrado del aparato; por ello, nunca tocaremos el hilo del interior del recipiente. El mejor tipo de hilo que podremos usar es el de nilón trenzado. Ordenados por orden de calidad, valdrán también: hilo dental de nilón ligero sin encerar, seda y poliéster. Un nilón monofilamento es un buen aislante, pero resulta difícil su manejo en las restantes etapas de la construcción en las que se requiere hilo.

Las hojas del electroscopio se hacen con láminas de aluminio normal. Se toma una plancha de 10 por 20 centímetros y se dobla de manera que obtengamos dos trozos plegados de 10 por 10 cada uno. Vuelven a doblarse para obtener cuatro pliegues de 5 por 10 centímetros cada uno. Con otro doblez, obtendremos 8 capas de aproximada-

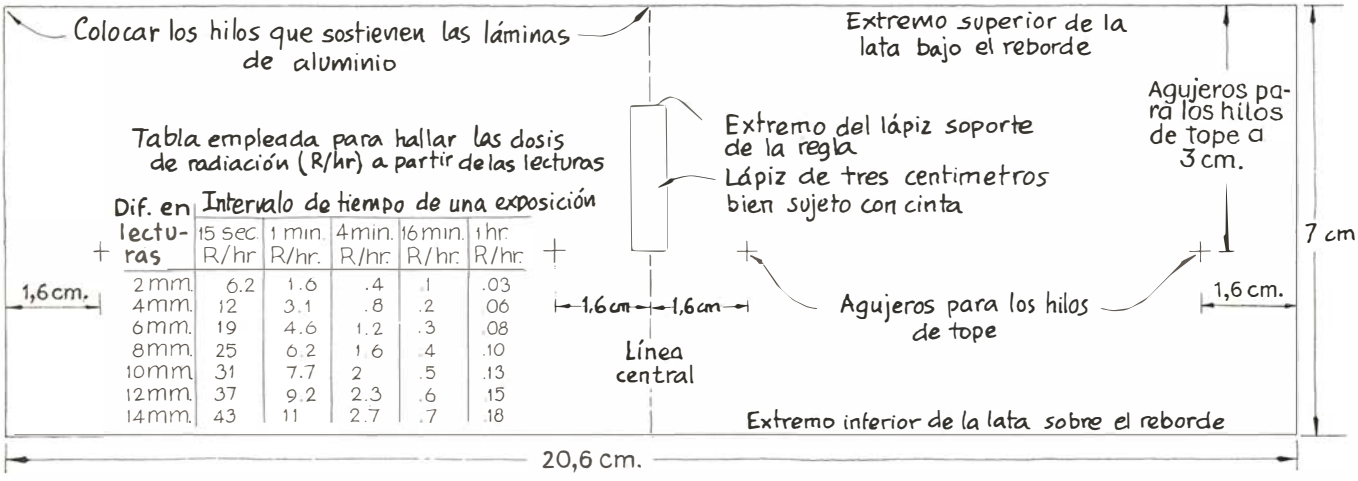
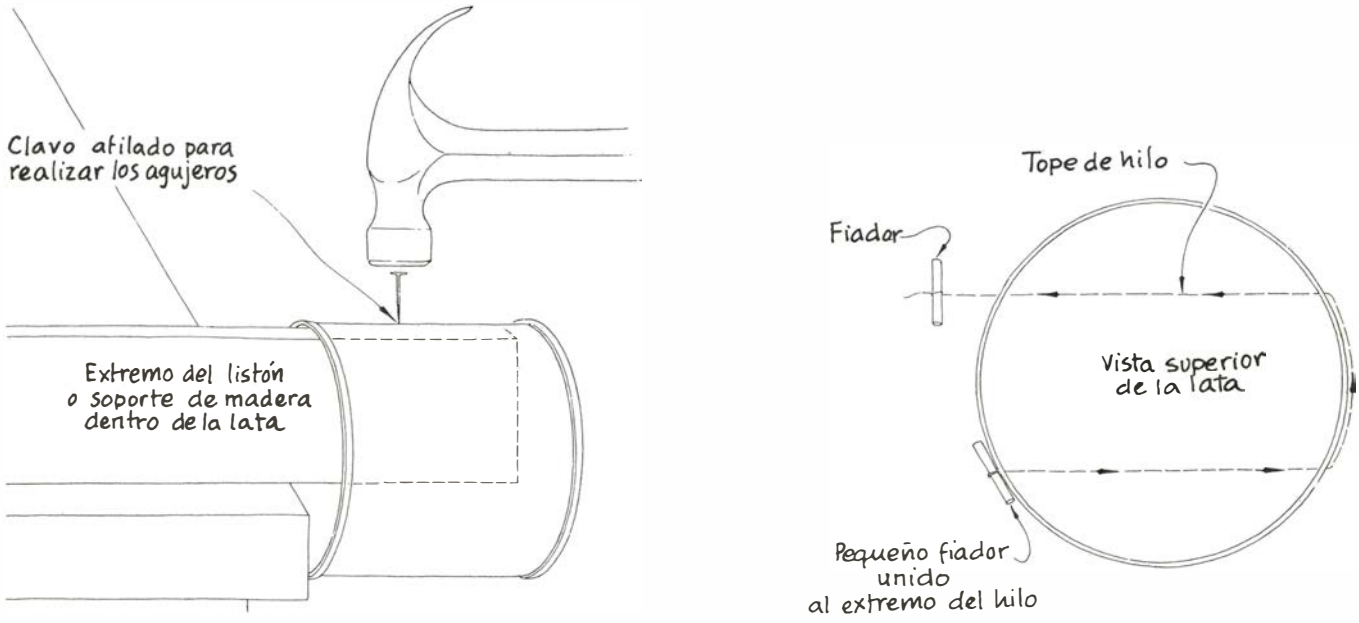


Tabla empleada para hallar las dosis de radiación (R/hr) a partir de las lecturas

Dif. en lecturas	Intervalo de tiempo de una exposición				
	15 sec. R/hr	1 min. R/hr.	4 min. R/hr.	16 min. R/hr.	1 hr. R/hr.
2 mm.	6.2	1.6	.4	.1	.03
4 mm.	12	3.1	.8	.2	.06
6 mm.	19	4.6	1.2	.3	.08
8 mm.	25	6.2	1.6	.4	.10
10 mm.	31	7.7	2	.5	.13
12 mm.	37	9.2	2.3	.6	.15
14 mm.	43	11	2.7	.7	.18

Etiqueta para la lata empleada como cámara de ionización



Procedimiento para colocar el tope de hilo

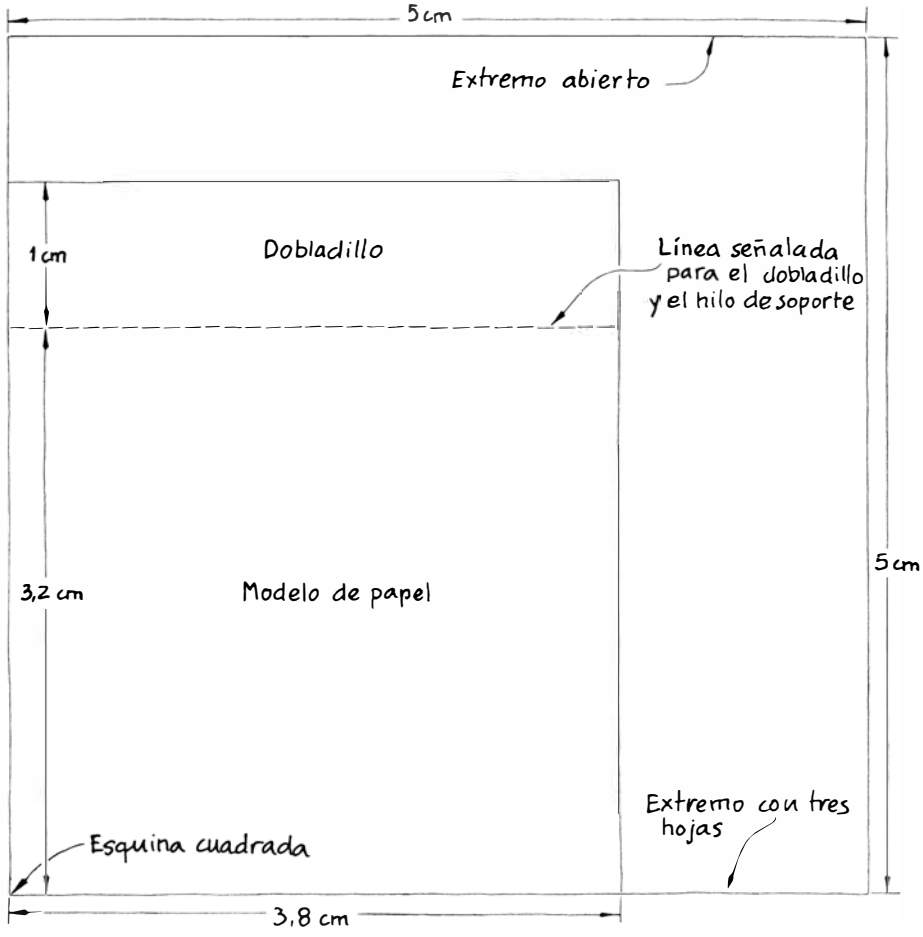
mente 5 por 5 centímetros cada una. Los pliegues deben hacerse de forma que los bordes coincidan perfectamente; si se hace así, se conseguirán ocho capas exactamente cuadradas. Se repite la misma manipulación con otra hoja.

Si disponemos sólo de una lámina de aluminio muy resistente, habrá que hacer hojas de cinco capas para asegurar una calibración correcta del aparato. Empezaremos con un trozo plano de 10 por 10 centímetros. Se plegará dos veces al objeto de obtener una pieza cuadrada de cinco por cinco con cuatro capas; le pegaremos luego otro trozo cuadrado de las mismas dimensiones para sacar así las cinco capas.

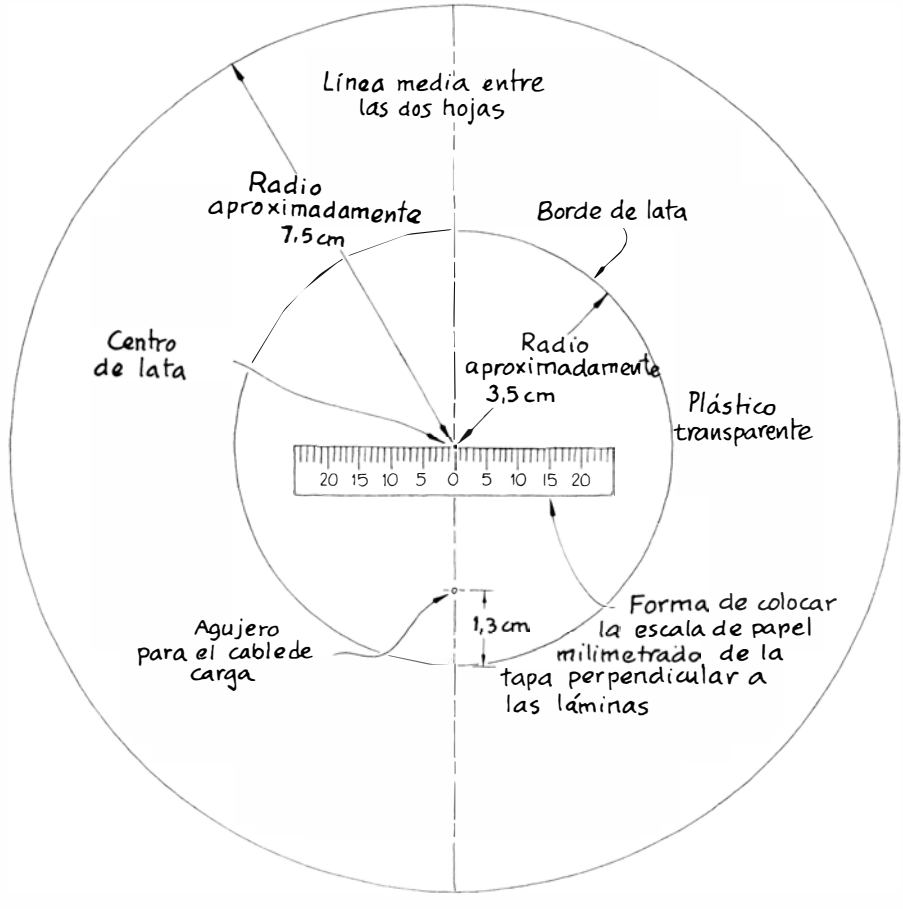
Siguiendo la ilustración superior de esta página dibújese un patrón con el cual recortar las hojas en la forma y tamaño adecuado. Colóquese el patrón sobre la lámina plegada; presiónese hacia abajo hasta que la hoja quede tan plana como sea posible, colocando una esquina del patrón sobre una esquina de la hoja, que también será exactamente cuadrada. Recórrase, con un lápiz afilado, las líneas del patrón para marcar el sitio por donde debe ir el hilo una vez que la hoja quede suspendida. La marca incisa con el lápiz deberá ser lo suficientemente profunda como para facilitar el pliegue cuando hayamos de doblar un trozo de lámina sobre sí misma y formar una suerte de dobladillo. Eliminaremos luego el patrón, cortaremos la hoja de su tamaño, doblaremos el borde una vez y se alisará después en su sitio original.

Para montar el hilo de soporte en la hoja se necesita cierta destreza; se comienza con el montaje patrón, dibujando el modelo a escala en una hoja de papel blanco; se corta luego un trozo de hilo de unos 22 centímetros de largo, procurando no tocar ni manchar ninguna parte del mismo excepto los extremos. Se cortan unos trozos de cinta adhesiva de las medidas de los rectángulos señalados en el modelo; se pone ésta en los rectángulos; se estira el hilo entre los mismos y se coloca otro trozo de cinta adhesiva en cada extremo del hilo para sujetarlo (si alguien puede echarle una mano le resultará más fácil). La razón que justifica colocar una doble capa de cinta adhesiva es que en algún momento hay que retirar el hilo del modelo. Cuando esto suceda, la capa de abajo seguirá en el papel patrón y la de arriba se arrancará con el hilo.

Prepararemos la hoja que debe montarse extendiendo cola a lo largo de la línea del dobladillo y dentro de la hoja en todos los pliegues que tengan el borde libre. Además de sujetar el borde en su sitio una vez que esté doblado, la



Patrón para realizar las láminas de papel de aluminio



Detalles de la cubierta transparente de la lata

cola impedirá que el hilo se mueva a lo largo del doblez y que, al deslizarse, destruya el calibrado del contador. Hay que andar con cuidado para que no caiga cola cerca de los extremos del dobladillo, porque si traspasara cuando el borde estuviera terminado, el hilo se tornaría rígido.

Si no tenemos cola a mano, podremos cortar dos trozos de cinta adhesiva de 25 por 3 milímetros aproximadamente, que se montarán en la hoja con los ángulos que se muestran en la ilustración de esta misma página. La parte adhesiva se colocará hacia arriba, excepto en los extremos, doblados de manera que se peguen a la lámina. Cuando esté la hoja montada sobre el hilo, el borde se doblará por encima y las cintas adhesivas asegurarán uno y otro.

Para colocar la hoja en el hilo sin rozarlo con los dedos hay que levantar el punto medio del hilo con un cuchillo y hacer pasar la hoja por debajo (el hilo estará todavía sujeto al modelo); se irá moviendo luego la hoja hasta que el hilo quede dentro del doblez del borde al bajar la hebra. Una vez colocada ésta en el doblez, se debe sujetar hacia abajo con la punta del cuchillo mientras doblamos el borde. Hay que asegurarse de que el hilo emerge de forma adecuada en la línea del doblez. Después se aprieta éste para asegurarse de que la cola o la cinta adhesiva lo sujeta bien.

Con un bolígrafo haremos luego dos señales en los lugares indicados en el hilo. Las marcas señalan el lugar donde deberá apoyarse el hilo en el borde de la lata cuando se monte la hoja dentro. Fíjense luego en la hoja cinco tiras de cinta adhesiva, de 6 por 3 milímetros cada una, para sujetar las piezas del montaje. Pondremos tres de ellas a lo largo del borde y dos en los extremos de la hoja donde existan pliegues simples.

Concluida esa fase, levantaremos la hoja y el hilo del patrón de papel, manteniendo la pieza superior de la cinta adhesiva de cada extremo unida al hilo. Se montará éste y la hoja dentro de la lata, de acuerdo con las señales de bolígrafo hechas en el borde de la lata y con la cinta adhesiva pegada al exterior de la misma. Hágase después el soporte para la otra hoja y móntese también. Los hilos cruzarán los bordes de la lata por el mismo punto. Para evitar que resbalen por el borde, podemos surcar unas pequeñas muescas en los puntos de cruce. Los bordes deben oponerse entre sí; se agregarán trocitos de cinta adhesiva exterior de la cinta justo debajo del borde para que el hilo se mantenga en su sitio. Los extremos superiores de las cintas llegarán hasta el borde. Sujetaremos con cinta, por último, el resto del hilo que pasa por el exterior de la lata.

Para calibrar debidamente el contador es necesario observar la separación de las hojas desde una altura determinada. A tal fin, colocaremos una regla de treinta centímetros en el plano medio de la cara y un soporte situado en la parte exterior de la lata (puede servir un cabo de lápiz pegado al exterior de la lata de manera que la parte superior de éste se halle unos 2 centímetros por debajo del borde superior de la lata). Cuando esté montado en el lugar indicado en la etiqueta, la mirada del observador enfocará directamente la zona media entre hojas.

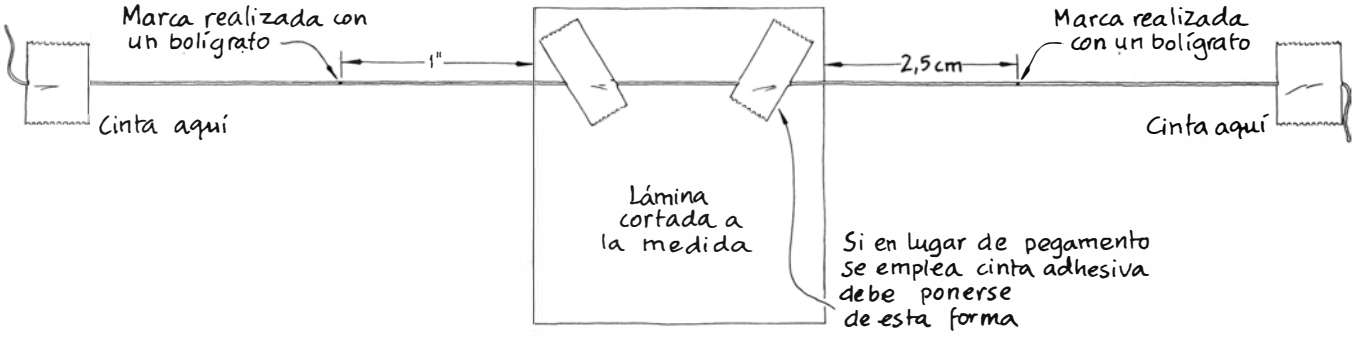
La humedad destruye el calibrado del contador. Para evitarla, colocaremos un agente secador dentro de la lata. Esta sustancia (una anhidrita) puede lograrse calentando trozos de cartón de yeso común. No usaremos nunca cloruro de calcio. Quitar el papel y la cola del cartón de yeso humedeciendo el papel. El yeso se fragmenta en múltiples pedazos y se coloca en un cuenco hecho con papel de aluminio; se seca después durante una hora a una temperatura superior a los 204 grados Celsius en el horno. Para tener siempre a mano suficiente yeso seco, prepararemos varios paquetes simultáneamente, que guardaremos en un tarro sellado. El contador de radiación necesita un paquete por vez en el interior de la lata.

Para evitar la difusión del aire hacia dentro y hacia fuera, la lata está provista de una cubierta de plástico, pero su tapa tiene que poder desmontarse fácilmente para añadirle la anhidrita. Si no logramos dar con la tapa adecuada (de una lata de frutos secos, por ejemplo), bueno será que nos fabriquemos una de plástico de 4 milímetros de espesor (del tipo que se usa para proteger las ventanas) o cualquier otro plástico fuerte y transparente. ¿Cómo obtenerla? Se corta un círculo del tamaño indicado en la ilustración inferior de la página anterior, se estira el círculo de la parte alta de la lata y se ajusta bien el borde de la misma para que no queden arrugas en la superficie; se sujeta luego con una banda de plástico bien fuerte; se coloca a lo largo del borde cinta adhesiva de medio centímetro de ancho, de manera que la tapa mantenga su forma cuando sea retirada de la lata y se amolde mejor. Se recomienda usar una cinta adhesiva de tela (esparadrapo), pero también puede servir la de papel corriente poniendo dos capas.

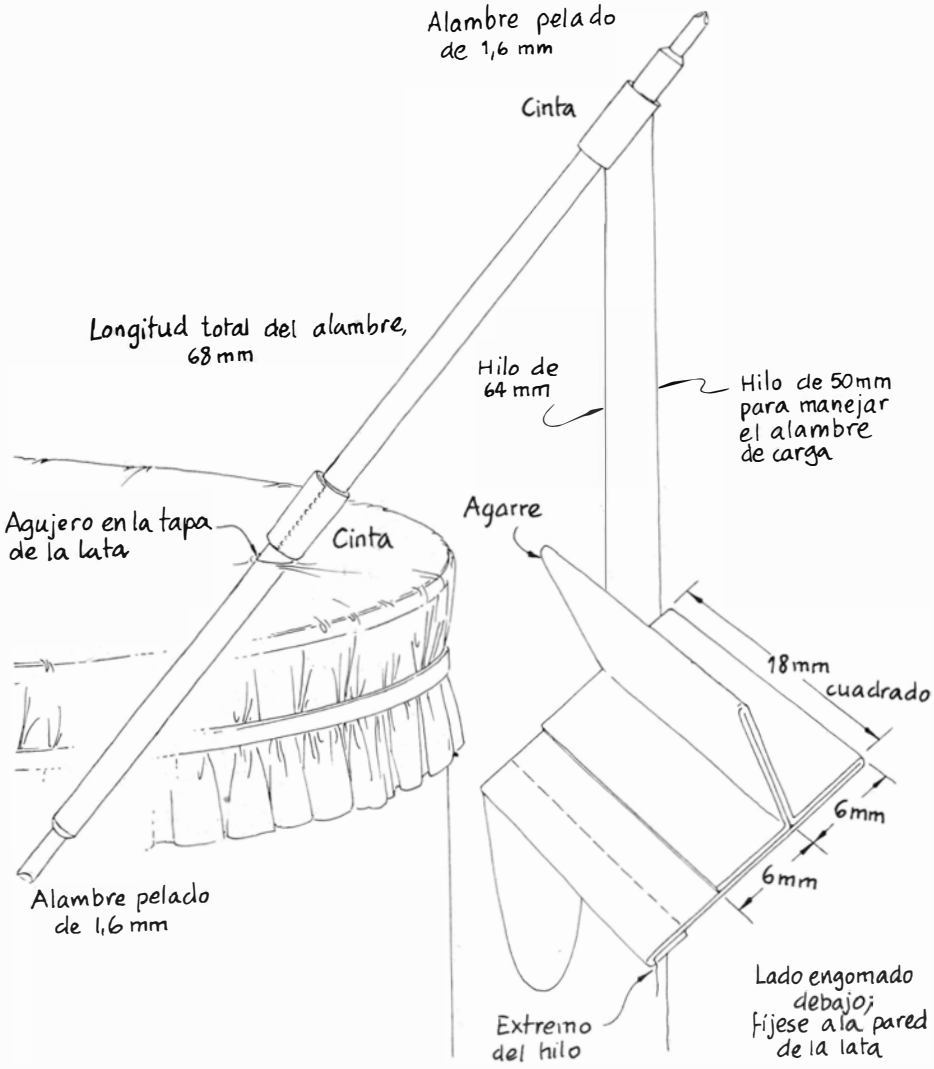
A unos 25 milímetros del borde de la lata, cortaremos el plástico sobrante. Se incide una muesca en el mismo sitio donde habíamos pegado el trozo de lápiz al lateral de la lata. Quitamos la tapa de plástico; se añaden pequeños trozos de cinta adhesiva alrededor del reborde recortado, tanto en el exterior como en el interior para hacerlo más firme, pero teniendo cuidado de no cerrar demasiado el borde y luego sea difícil volver a ponerlo en su sitio.

Siguiendo el modelo se colocará una escala en milímetros encima de la tapa de plástico; ésta deberá ser perpendicular a las hojas que hay debajo, de modo que, al mirar hacia abajo –a través de la tapa transparente–, pueda medirse la separación de los extremos inferiores de las hojas al observarlas simultáneamente con la escala.

El paso siguiente va a consistir en preparar el cable con el que hemos de cargar las hojas. Puede servir uno del tipo de los utilizados para los timbres de las puertas (que tienen un diámetro exterior de unos 1,6 milímetros) o cualquier otro similar. Ambos extremos del cable deben estar pelados. Hacia la mitad del mismo, se enrolla un poco de



Modo de colocar una lámina en su hilo soporte



Montaje para el cable de carga

cinta adhesiva con una gota de cola. Arróllese más cinta cerca del extremo superior, con el fin de pegar unos 125 milímetros de hilo por su parte media. Los hilos servirán para manejar el cable próximo a las hojas cuando estemos cargando éstas y quitarlo mientras vayamos sacando medidas. Deberá quedar suelto un extremo del hilo; el otro se colocará entre dos tiras de cinta adhesiva. Una de ellas será lo suficientemente grande como para cubrir el hilo; la otra será aún mayor, y en ella se fijará también más cinta adhesiva o un poco de papel doblado lo bastante grande como para sujetarlo con dos dedos. Expuesta al exterior, quedará cierta fracción de la parte adhesiva de la cinta.

Desde este extremo del hilo podemos tirar de la cinta y del papel, de forma que el cable cargador esté bien colocado y pueda sujetarse al borde de la lata, dejando así libres ambas manos para cargar las hojas. El cable cargador se debe montar a través de un pequeño agujero abierto en la tapadera de plástico según la posición indicada en el modelo de la tapa. Luego se introducirá el cable hasta que la cinta adhesiva que antes habíamos colocado en la mitad de éste lo detenga.

Para cargar las hojas se llevará el extremo inferior del cable cargador a un lugar unos dos milímetros por encima del punto más alto de las hojas; se pegará el papel y la cinta de soporte del cable al lateral de la lata. Doblaremos uno o más trozos de papel en 20 pliegues y frotaremos éste sobre un trozo de plástico duro, sujeto por un lado. Con muchos tipos de plástico duro el contacto del papel y el plástico dará como resultado una separación de cargas que dota al plástico de una carga neta positiva o negativa (el signo no importa). La utilidad de las múltiples capas de papel estriba en que evitan que el plástico se descargue a través de la mano. La descarga a través de la mano que está sujetando un extremo del plástico es insignificante porque ase sólo una pequeña parte del mismo.

Cargado el plástico, debemos colocarlo cerca del extremo superior del cable cargador; tal vez se escapen pequeñas chispas entre el extremo inferior del cable y las hojas (las chispas se hacen visibles cuando apagamos las luces de la habitación). A medida que la carga se va acumulando en las hojas, el cable cargador puede ser rechazado por éstas en virtud de la repulsión electrostática. Para cargar suficientemente las hojas, quizás haya que sujetar el cable en su sitio tirando de uno de sus hilos.

Se puede conseguir también una gran carga electrostática enrollando rápidamente ciertos tipos de cinta adhesiva. Hay que arrollar así varios centímetros, poniendo el lado adherente hacia el extremo superior del cable cargador a una distancia de unos 5 milímetros de éste y moviendo la cinta con suavidad para que ocurra la transferencia de carga. Finalizada la cual, se enrolla la cinta de nuevo, para su uso posterior.

Si hemos de utilizar el contador en un ambiente muy húmedo, convendrá introducirlo en el interior de un recipiente grande, un cubo tapado con el mismo tipo de plástico empleado anteriormente, por ejemplo. El plástico se ajustará bien al cubo; abriremos luego unos agujeros por donde podamos introducir la mano; se taponarán con algún material envolvente para que el contador funcione sin exponerlo al aire exterior. Pondremos anhidrita en el cubo. Las lecturas podrán tomarse en el interior del cubo, siempre que se mantenga la distancia adecuada entre el contador y las cejas. Los materiales cargadores (plástico duro, cinta adhesiva y papel) también pueden guardarse en el cubo y preservarlos allí de la humedad ambiente.

Para medir el nivel de radiación con el contador, hay que cargar las hojas y quitar luego el cable cargador. Las hojas recibirán el potencial suficiente que les obligue a una repulsión superior a los siete milímetros (medidos con la escala de la tapadera), pero no hasta el extremo de que cualquiera de ellas alcance su hilo tope (las deflecciones de las hojas es difícil que sean iguales; no obstante, la discrepancia no afecta a las lecturas del instrumento, pues sólo importa el cambio en la separación entre hojas).

Pondremos el contador en una superficie horizontal, elevada un metro por encima del suelo. Colocaremos la regla entre su asiento y las cejas del observador, de forma que la vista penetre por entre las hojas. La separación de los extremos inferiores de las hojas se mide con relación a la escala, que está también dentro del campo de visión. El calibrado del instrumento depende de si podemos enfocar la mirada en una altura adecuada, por encima de la escala y las hojas.

Ingvar y Niels A. Lassen. Munksgaard, 1975.

THE BIOLOGICAL ROOTS OF MENTAL ILLNESS: THEIR RAMIFICATIONS THROUGH CEREBRAL METABOLISM, SYNAPTIC ACTIVITY, GENETICS, AND THE ENVIRONMENT. Seymour S. Kety en *The Harvey Lectures,* serie 71, págs. 1-22; 1978.

GENETIC TRANSMISSION OF SCHIZOPHRENIA. Dennis K. Kinney y Steven Matthysse en *Annual Review of Medicine,* vol. 29, págs. 459-473; 1978.

RITMOS ELECTRICOS DEL CEREBRO E INTEGRACION SENSORIOMOTRIZ

THE SEPTAL NUCLEI. J. F. DeFrance. Plenum Press, 1974.

THE LIMBIC SYSTEM. R. L. Isaacson. Plenum Press, 1974.

THE HIPPOCAMPUS AS A COGNITIVE MAP. J. O'Keefe y L. Nadel. Oxford University Press, 1978.

REFLEXIONES EN TORNO AL CEREBRO

THE GENETICS OF *CAENORHABDITIS ELEGANS.* S. Brenner en *Genetics,* vol. 77, n.º 1, págs. 71-94; enero, 1974.

CENTRAL PROJECTION OF OPTIC TRACT FROM TRANSLOCATED EYES IN THE LEOPARD FROG (*RANA PIPIENS*). Martha Constantine-Paton and Robert R. Capranica en *Science,* vol. 189, n.º 4201, págs. 480-482; 1975.

JUEGOS MATEMATICOS

PROSE POEMS. William S. Walsh en *Handy-Book of Literary Curiosities.* Gale Research Co., 1966.

GRAPHICAL SOLUTION OF THE EQUATION $a^b = b^a$. Thomas W. Shilgalis en *The Mathematics Teacher,* vol. 66, n.º 3, pág. 235; marzo, 1973.

TALLER Y LABORATORIO

THE EFFECTS OF NUCLEAR WEAPONS. Dirigido por Samuel Glasstone y Philip J. Dolan. U.S. Department of Defense and U.S. Department of Energy. Government Printing Office, 1977.

THE KFM: A HOMEMADE YET ACCURATE AND DEPENDABLE FALLOUT METER. Cresson H. Kearny, Paul R. Barnes, Conrad V. Chester y Margaret W. Cortner. Oak Ridge National Laboratory. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce; enero, 1978.

Taller y laboratorio

El "rattleback", extraña piedra que primero gira en un sentido y después en el contrario

Jearl Walker

Si se hace girar un cierto tipo de piedra en un sentido "erróneo", se parará muy pronto, se agitará hacia arriba y hacia abajo durante unos segundos y tomará luego un giro en sentido opuesto. Pero si se hubiera puesto a girar en el rumbo "correcto", daría vueltas de forma estable. La piedra está aparentemente inclinada hacia una dirección de giro. Incluso llegará a desarrollar un sentido de giro en esa dirección con sólo golpear levemente un extremo de la piedra hacia abajo. El balanceo de la misma causado por el golpecito se convertirá rápidamente en giro.

Estas piedras tan curiosas fueron llamadas "celtas" originalmente, porque su comportamiento fue descubierto por arqueólogos que estudiaban las hachas y azuelas del mismo nombre. Yo me imagino que el cambio del sentido de giro fue observado primero por un arqueólogo que movía distraídamente una de las "celtas" sobre una mesa. Mi encuentro con estas piedras se produjo hace unos años cuando leí el delicioso libro de Harold Crabtree titulado *Tratamiento elemental del giro de las peonzas y giróscopos.* Entre los diferentes tipos de peonzas, aros y otros juguetes que describía estaban las misteriosas "celtas", pero sin indicar por qué mostraban inclinación hacia una dirección de giro. Mi interés por estas piedras se ha visto reavivado recientemente por dos personas: Nicholas A. Wheeler, del Reed College, que está pensando en la posibilidad de hacer una investigación analítica de las mismas (si llegara a efectuarla, sería el primer estudio de estas piedras desde el siglo XIX, que yo sepa) y A.D. Moore, de la Universidad de Michigan, que me ha enviado algunos de los cientos de "celtas" que ha hecho con piedra, cucharas y otros materiales. Moore ha dado a estas piedras el nombre de "rattlebacks", término que emplearé en el presente artículo.

La mayoría de los "rattlebacks" tienen una base suave elipsoidal, pero la parte superior puede ser plana, hueca o elipsoidal. La inclinación del giro resulta, verosimilmente de la forma de la base y la distribución de la masa con respecto al eje de giro. El rattleback típico de la colección de Moore posee la parte de arriba lisa y rectangular. La característica principal del diseño es que el eje mayor de la elipse forma un ángulo de entre 5 y 10 grados con el eje mayor de la parte rectangular. Esta oblicuidad (y quizás alguna forma sutil de la elipse) introduce la predisposición de la piedra a girar, aunque de una forma que no resulta fácil observarla con detalle.

La mayoría de los rattlebacks que me ha enviado Moore giran, vistos desde arriba, en el sentido de las agujas del reloj. Cuando hago girar un tal rattleback en ese sentido, va rodando suavemente hasta que el rozamiento acaba por detenerlo. Cuando lo hago girar en sentido contrario al de las agujas del reloj, primero da unas cuantas vueltas, pero después se va parando a medida que empieza a balancearse de arriba abajo por sus extremos. Pronto comienza a girar en el sentido horario hasta que lo detiene el rozamiento. Si, cuando está parada, tocamos con un dedo la punta de la piedra, los extremos oscilarán de arriba abajo durante unos segundos y a continuación empezará a girar en el sentido de las agujas del reloj. La piedra se parará, a la larga, debido a la fricción con la mesa.

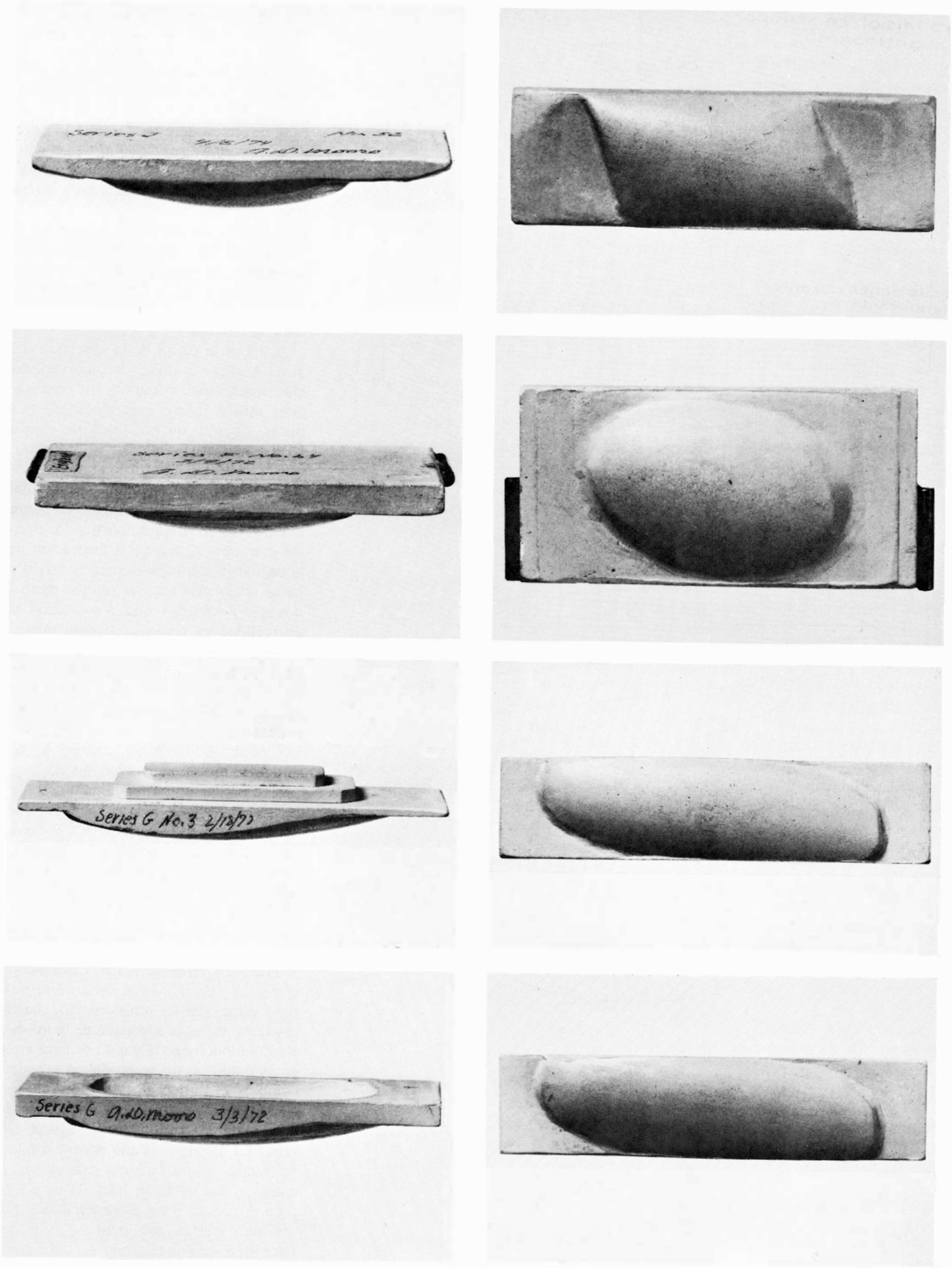
Algunos rattlebacks desarrollan una segunda inversión: pasan de girar en el sentido horario a hacerlo en sentido contrario, poco antes de detenerse justo cuando el rozamiento está a punto de agotar las últimas energías de la piedra. La segunda inversión no suele ser tan fuerte como la primera, ni desarrolla el mismo tipo de oscilación vertical. Antes bien, la piedra se balancea de un lado a otro, no longitudinalmente. Algunos de los rattlebacks desarrollan fuertes inversiones con cualquier sentido de giro.

Moore fabrica la mayoría de sus rattlebacks con cemento dental, al que pule y barniza. Cuando saca uno bueno (trabajo que requiere pericia y suerte) construye un molde del mismo para duplicarlo. Algunos de sus rattlebacks están hechos de la parte cóncava de una cuchara, cuyo mango ha cortado. Después la pega a una pieza plana y rectangular de metal o plexiglás con el eje largo de la elipse de la cuchara en ángulo con el eje largo del rectángulo. A veces añade algunas monedas encima de la pieza rectangular para aumentar el peso y cambiar el momento de inercia del rattleback.

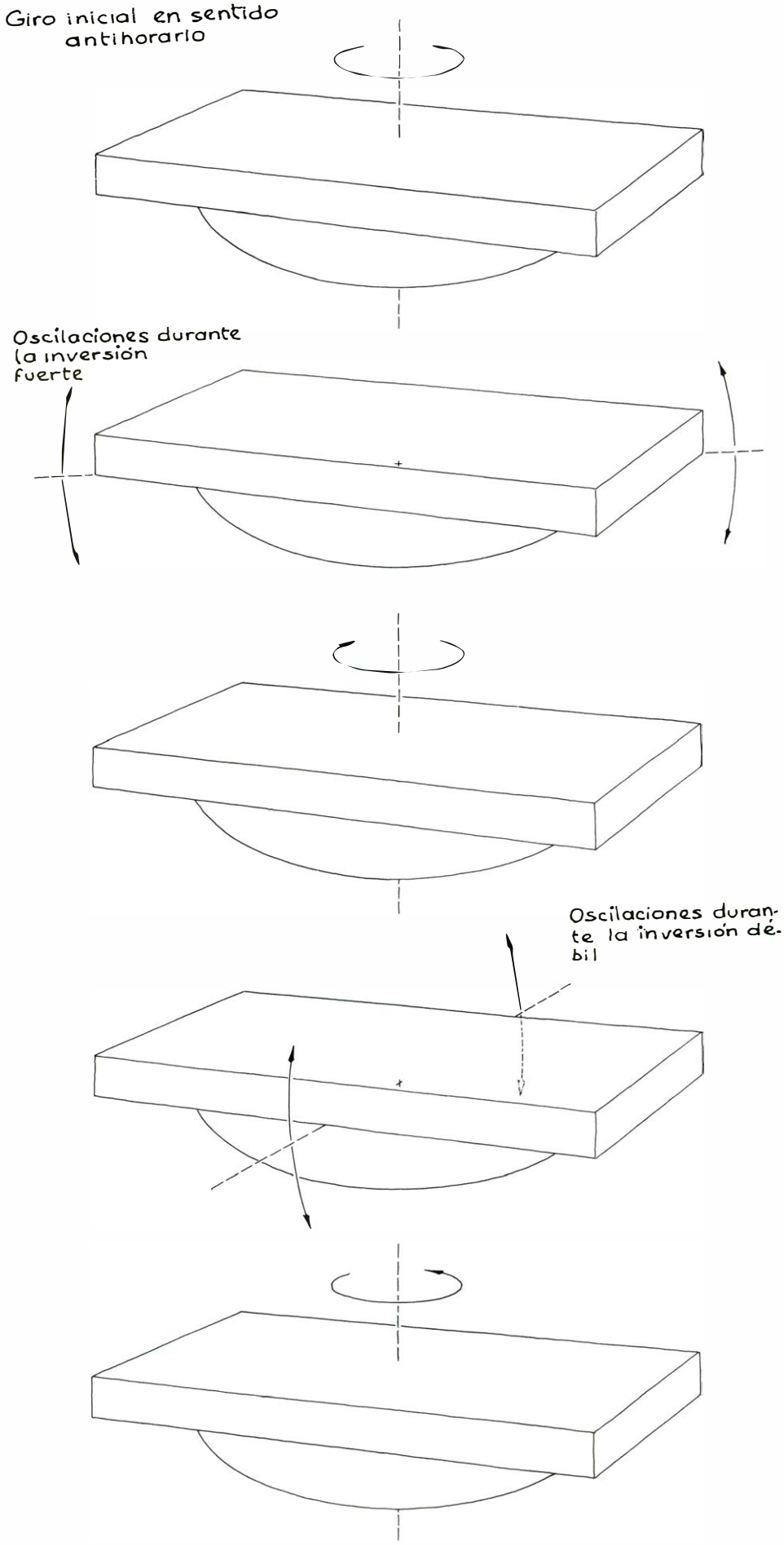
Existe un tipo de rattleback que recuerda la forma del huevo duro cortado por la mitad. Sobre su cara plana, Moore le pegó una barilla de metal en ángulo con el eje largo. Hay otro tipo similar al diseño básico; la única diferencia estriba en que el interior está vaciado para que parezca un barco. Otro modelo se caracteriza por una serie de placas planas y escalonadas en el centro de la parte superior del modelo básico.

El rattleback favorito de Moore debe ser el semihuevo, ya que una vez participó en un concurso con C. L. Stong, autor durante un año de esta sección, para ver cuál de los dos conseguía mayor cantidad de inversiones de giro con un rattleback. Ganó Moore con el modelo de semihuevo, que realizó más de 15 cambios antes de pararse.

Cuando examiné los rattlebacks encontré que el modelo básico mostraba la inversión más fuerte (de girar en sentido antihorario a girar en sentido horario), a la que seguía una segunda inversión más ligera cuando la piedra ya casi había agotado toda su energía. El rattleback con las monedas y el de las placas escalonadas se portaban casi tan bien como el tipo básico. El semihuevo no giraba bien, tendiendo a oscilar tanto que los extremos de la barilla arañaban la mesa y con el roce le restaban fuerza. Moore no se explica bien por qué este modelo, en principio ganador, se porta



Vistas laterales **(izquierda)** *e inferiores* **(derecha)** *de "rattlebacks" hechos por A.D. Moore*



Un "rattleback" que experimenta una inversión fuerte y otra débil

tan mal después, aunque sospecha que la causa podría ser una pequeñísima grieta en la superficie de la base.

El más fascinante de todos los rattlebacks es el que tiene forma de barco, porque desarrolla fuertes inversiones en cada dirección de giro. Cuando lo hago girar en sentido contrario al de las agujas del reloj, efectúa parte de una revolución, se para, oscila bruscamente arriba y abajo e invierte después su giro durante varias revoluciones. Deja de girar otra vez, se balancea de un lado a otro y empieza a dar vueltas en sentido contrario al de las agujas del reloj. Esta actividad continúa hasta que la piedra agota toda su energía.

¿Cuál es la causa de la inversión del giro? Aunque es difícil dar una explicación matemática completa, su observación atenta puede sugerirnos algunas pistas. Cuando un rattleback de diseño básico empieza a invertir su rotación, que tenía sentido contrario al de las agujas del reloj, su oscilación longitudinal parece estar aproximadamente en torno al eje corto de la elipse, porque los puntos marcados C y D en la ilustración de la página siguiente oscilan hacia arriba y hacia abajo más que los puntos marcados A y F (creemos que la oscilación es en realidad en torno a otro eje importante; nos referimos a uno de los ejes principales de la piedra, que es casi paralelo al eje corto de la elipse). De alguna forma, la rotación en sentido antihorario provoca una inestabilidad de este tipo.

Cuando el rattleback realiza la segunda y más suave inversión de giro, parece oscilar aproximadamente alrededor del eje mayor de la elipse, enviando los puntos G y H hacia arriba y hacia abajo con mayor amplitud que otros puntos (de nuevo, teóricamente, el eje real es un eje principal casi coincidente con el eje mayor). Parece ser que el giro hacia la derecha provoca este tipo de inestabilidad.

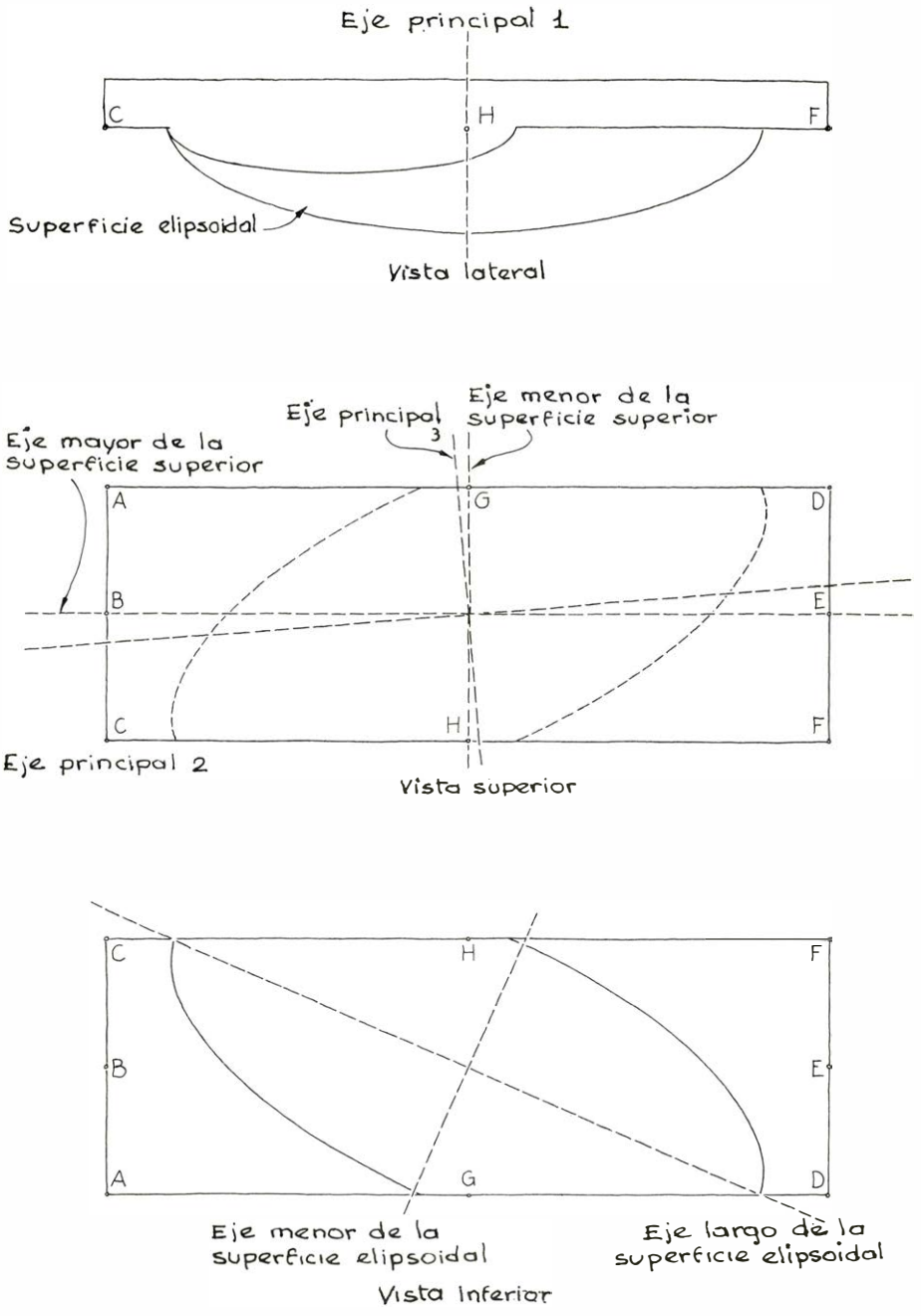
Podemos desencadenar fácilmente cualquier tipo de oscilación en una piedra estacionaria, presionando hacia abajo en un lugar adecuado de la misma y soltándola luego. Cuando se hace esto en el punto A, no se producen grandes cambios, el rattleback oscila durante un corto tiempo y girará quizá ligeramente en sentido contrario al de las agujas del reloj. En el punto B una acción similar se traduce en oscilaciones más pronunciadas y una rotación hacia la derecha, pero el resultado no es espectacular. Se obtienen efectos más llamativos si se hace lo mismo en el punto C; las oscilaciones longitudinales son más vigorosas y la piedra comienza a girar rápidamente en el sentido de las agujas del re-

loj. Las oscilaciones son idénticas a las que se pueden ver cuando se produce una inversión en el sentido de giro.

Al presionar, y luego soltar, el punto *G*, la piedra se balancea de un lado a otro y empieza a girar en sentido contrario al de las agujas del reloj. Así pues, cuando se provocan las oscilaciones verticales en *G*, se está duplicando el segundo tipo de inversión de giro (desde la rotación inicial en el sentido de las agujas del reloj). Se obtienen resultados similares cuando se presiona, y se suelta, la piedra en otros puntos entre *G* y *A*. Las oscilaciones transversales resultan más lentas que las longitudinales, pero ambos tipos son tan rápidos que no podemos seguir el movimiento fácilmente. Sin embargo, en cuanto se inician las oscilaciones, la piedra comienza a girar y la perspectiva del observador se altera. Para seguir mejor las oscilaciones traté de manipular un rattleback que había colocado sobre una tira de papel adhesivo con el lado adherente hacia arriba. La cinta evitaba que la piedra girara, pero quizá interfirió en el movimiento natural del objeto. Aun cuando la piedra parecía oscilar principalmente en torno a un eje único, se comportaba también como si rodase fuera del plano primario de oscilación. No estoy seguro de que esta característica sea esencial para la inversión de giro.

La primera investigación científica de piedras que efectuaban inversión de giro se debe a G. T. Walker (que, por cierto, no es ningún antepasado mío), en 1896. Algunos de sus resultados pueden leerse todavía en reimpresiones de libros antiguos relacionados con elementos mecánicos rotatorios. La descripción de las piedras suele darse en el capítulo dedicado a las peonzas asimétricas (peonzas que carecen de simetría respecto al eje vertical). Las discusiones teóricas sobre peonzas simétricas son muy sugestivas, pero la teoría de las peonzas asimétricas constituye un auténtico rompecabezas para la mente.

Un rattleback que se precie debe reunir ciertas características básicas. Hay que atender, por ejemplo, a la no alineación de los ejes principales de la piedra y los ejes del elipsoide de la base. El eje principal de un objeto es aquel en torno al cual se puede hacer girar el mismo libremente sin rotación en torno a ninguno de los otros dos ejes pricipales. Los tres ejes mutuamente perpendiculares se hallan normalmente a lo largo de los ejes de simetría en la mayoría de objetos. Si la elipse estuviera en línea con el extremo rectangular del rattleback básico de Moore, los ejes principales serían fáciles de encontrar, porque



Los ejes de un "rattleback" inclinados para rotar en sentido horario

coincidirían con los ejes de simetría. Un eje sería vertical y los otros dos serían paralelos a los ejes menor y mayor de la elipse. Todos ellos se cruzarían en el centro de masas de la piedra.

La base elipsoidal de un buen rattleback no está alineada con la placa rectangular superior. El eje vertical es todavía un eje principal, pero los otros dos han cambiado ahora en torno al vertical en la misma dirección en que se ha sacado la base elipsoidal de la alineación con la placa rectangular. Uno de estos ejes principales, que llamaremos eje 2, está en algún sitio entre el eje mayor de dicha placa rectangular y el eje mayor del elipsoide. El otro, eje 3, se halla entre los dos ejes menores correspondientes y es perpendicular al eje 2. Sus situaciones exactas dependen de la distribución relativa de la masa de la placa rectangular y del elipsoide. La no alineación del elipsoide con los ejes principales es una característica esencial en la inversión del giro.

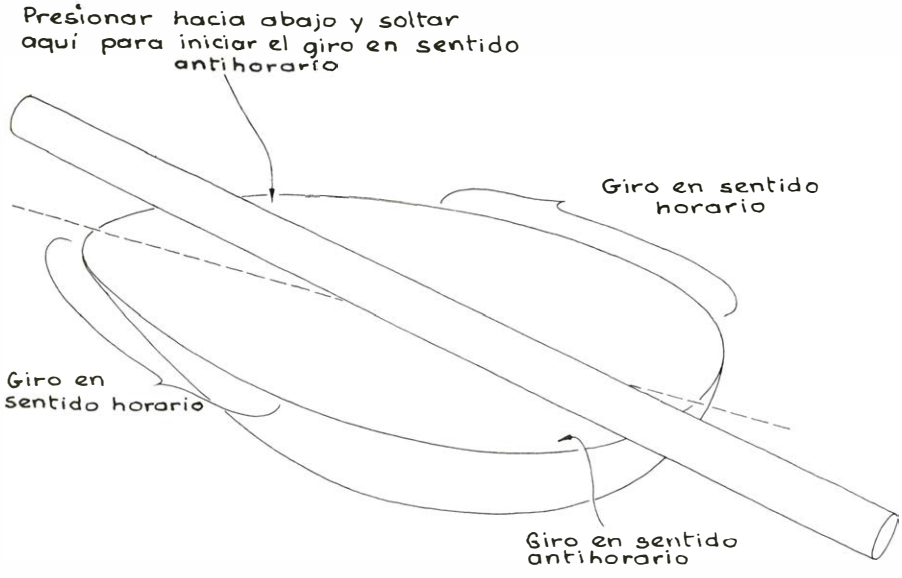
Una segunda característica importante de un rattleback bien hecho es que el radio de curvatura se conserva distinto a lo largo de los dos ejes del elipsoide. (A una superficie que esté poco curvada le corresponderá un gran radio de curvatura). Si la base fuera perfectamente esférica, el rattleback no invertiría su giro.

Importa que la distribución de la masa de la piedra sea diferente para los dos ejes principales. La función que nos da la distribución de la masa con respecto a un eje concreto se llama "momento de inercia". Consideremos el eje principal 3, cuando uno de los rattlebacks de Moore oscila hacia arriba y hacia abajo en torno a ese eje. Como lo hace durante una inversión fuerte de giro, el momento de inercia para la oscilación es relativamente grande porque parte de la masa está a una distancia relativamente grande del eje. Supongamos que la piedra gira en torno al eje principal 2, como lo hace durante el segundo, y más débil, tipo de inversión de giro. El momento de inercia para esa oscilación es relativamente pequeño, porque la mayor parte de la masa está bastante próxima al eje. Esta diferencia en el momento de inercia de los dos ejes horizontales principales es esencial para el éxito del rattleback.

En resumen, el rattleback de Moore tiene las siguientes características: el eje mayor de la elipse (el correspondiente a un radio de curvatura más grande) está desviado en sentido contrario al movimiento de las agujas del reloj (visto desde arriba) del eje principal 2, que tiene un pequeño momento de inercia. Esta disposición causa en el rattleback una fuerte inversión del sentido de giro, que deja de ser antihorario para tener el mismo rumbo que las agujas del reloj y luego una nueva inversión, más débil de la rotación. ¿Qué sucedería si el eje mayor del elipsoide se hubiera desviado en el otro sentido? ¿Se producirían las inversiones de giro fuerte y débil en el sentido opuesto? Aunque el trabajo teórico de G.T. Walker predice el comportamiento, prefiero dejar la pregunta en el aire para que sea el lector quien la responda usando los rattlebacks tallados adecuadamente.

¿Por qué las características de diseño del rattleback de Moore inducen que la piedra cambie su sentido de giro? En primer lugar la hacen inestable frente a las pequeñas perturbaciones del giro alrededor del eje vertical. Si la base fuera esférica, o el elipsoide estuviese alineado con los ejes principales, cualquier pequeña perturbación tendría una escasa repercusión en el giro y no causaría oscilaciones notables. Sin embargo, con una piedra de la forma adecuada, las pequeñas perturbaciones del giro inicial de la piedra o las producidas por el tablero de la mesa generan oscilaciones que crecen rápidamente en amplitud. El hecho de que se desarrolle una inestabilidad u otra depende de la dirección de giro y de la forma de la piedra.

Supongamos que un rattleback con la forma básica está girando en sentido contrario al de las agujas del reloj; debido a su diseño, cualquier pequeña perturbación que cause una oscilación en torno al eje principal 3 se incrementará rápidamente. Las fuerzas de rozamiento que actúan sobre la piedra durante la oscilación detienen el giro y determinan que se inicie otro en sentido opuesto. Una vez que ha comenzado la rotación en sentido inverso, las fuerzas de rozamiento detienen la oscilación. Así pues, el giro en sentido contrario al de las agujas del reloj permite que cierto tipo de inestabilidad –la oscilación en torno al eje principal 3– aumenten en una forma rápida al tiempo que las fuerzas de fricción que acompañan a las oscilaciones inducen la inversión del sentido de giro.



Posibilidades rotatorias con el semihuevo de Moore

Si la piedra está girando inicialmente en sentido horario, se favorece otra inestabilidad, la que genera oscilación alrededor del otro eje horizontal principal. De nuevo, el diseño del rattleback hace que esta inestabilidad crezca exponencialmente en amplitud. Las fuerzas de fricción durante este tipo de oscilación hacen que se detenga el giro en sentido de las agujas del reloj, y se reinicie en sentido contrario.

Quise investigar cómo cambiaría el comportamiento de un rattleback si modificaba una de sus características fundamentales de diseño. La única característica que pude cambiar sin mayores dificultades fue el momento de inercia relativo respecto a los dos ejes horizontales principales. Para cambiarlo sujeté con cinta adhesiva un lápiz sobre la parte superior del rattleback; primero, paralelo a lo largo del rectángulo, y, luego, paralelo a su anchura. En cada prueba tuve cuidado de equilibrar el lápiz de manera que el rattleback girara en la misma zona del elipsoide.

Con el lápiz a lo largo, el rattleback se comportaba, en líneas generales, como lo había hecho anteriormente, puesto que el lapicero apenas aumentaba la diferencia de los momentos de inercia alrededor de los ejes principales. Con el lápiz a lo ancho, la piedra no invirtió su giro, ni mostró alguna de sus inestabilidades características. Situando el lápiz a lo ancho del rectángulo aumentaba el momento de inercia respecto al eje principal 3. Según se desprendía, aumentaba uno lo suficientemente como para hacerlo comparable con el otro. Cuando los momentos de inercia son parecidos, las oscilaciones debidas a pequeñas perturbaciones no crecen exponencialmente con el tiempo, sino que permanecen suaves. En ausencia de grandes oscilaciones alrededor de los ejes principales, las fuerzas de rozamiento con la superficie de la mesa no pueden detener el rattleback ni, en consecuencia, invertir su giro.

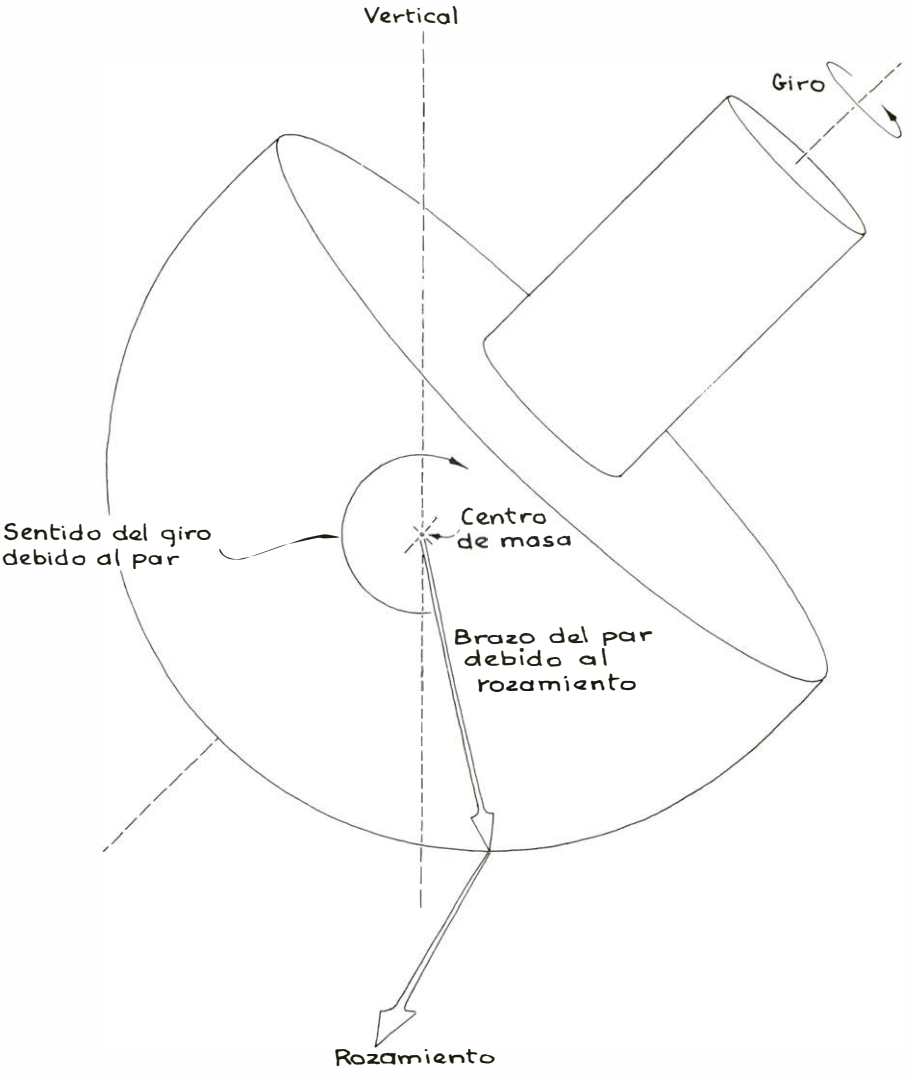
Un momento de inercia puede variarse de una forma más controlada montando pernos largos sobre el rattleback. Se situará un perno en cada sentido a lo largo de un eje principal y se roscan varias tuercas en sus extremos. Se modifica el momento de inercia moviendo las tuercas, aproximándolas al centro del rattleback, o alejándolas de él. (La piedra debe permanecer de todas formas equilibrada.) Con esta disposición conseguí, otra vez, eliminar las inversiones de giro cuando igualaba los momentos de inercia respecto de los dos ejes horizontales principales. ¿Qué suce-

dería si se ajustaran las tuercas para hacer que el momento de inercia alrededor del eje principal 2 fuera mayor que el correspondiente al eje principal 3? ¿Volvería a aparecer la inversión del giro, pero con los sentidos de las inversiones fuerte y débil cambiados?

El rattleback con forma de semihuevo de Moore tiene una varilla de latón por medio de la cual pueden alterarse los momentos de inercia (al cambiar de posición la varilla, se modifica la posición de los ejes principales). Al sujetar la varilla sobre la parte más estrecha de la cara plana, el huevo gira establemente en ambos sentidos. Con la varilla sobre el eje más largo de la cara plana, aparecen inversiones de giro e inestabilidades. Normalmente, se sitúa la varilla formando un pequeño ángulo con el eje más largo de la cara plana, según se muestra en la figura de la página opuesta. El semihuevo presenta una inversión débil en cada sentido de giro. Con la varilla montada de esta forma, el semihuevo es sensible también a golpecitos en su perímetro. El sentido del giro resultante depende del sitio donde se le golpee. La figura indica las distintas posibilidades.

El análisis de G. T. Walker predice que la frecuencia de la oscilación es, alrededor del eje principal 3, mayor que alrededor del eje 2, lo cual es fácilmente comprobable con un rattleback elemental. De sus ecuaciones se desprende, asimismo, que no aumenta ninguna inestabilidad si la frecuencia del giro es mayor que la frecuencia de la oscilación. Con los rattlebacks de Moore, mis esfuerzos por eliminar la inestabilidad en la inversión fuerte (la correspondiente al giro en sentido contrario al de las agujas del reloj) resultaron vanos, ya que mi impulso de giro inicial introducía inevitablemente inestabilidades. Sin embargo, fácilmente podía girar el rattleback en el sentido de las agujas del reloj con una frecuencia de giro mayor que la frecuencia de oscilación alrededor del eje principal 2. Por lo que yo mismo he podido comprobar, la oscilación no aparece hasta que el rozamiento ha menguado la velocidad de giro de la piedra, quizá hasta una frecuencia menor que la frecuencia de oscilación.

He jugado con rattlebacks de Moore sobre superficies pulidas de formica y sobre algunas otras. No he investigado los efectos del coeficiente de rozamiento entre el rattleback y la superficie en la que gira. Si la fuerza de rozamiento es muy alta, el giro desaparecerá tan deprisa que no dará tiempo a que se desarrollen inversiones de giro. Pero si el rozamiento es muy pequeño, la piedra apenas invertirá su giro, toda vez que la inversión precisa de la fricción.



Lo que ocurre cuando se invierte una peonza Tippe

Se pueden tallar rattlebacks en madera o cemento, después se ajustará la forma de la parte inferior hasta que se comporte correctamente. Podemos introducir variaciones en el diseño básico. Vale la pena, por ejemplo, investigar el efecto de la distribución de peso, sujetando con cinta adhesiva pesas o varillas metálicas a la superficie superior. Construyendo varios rattlebacks, lograremos determinar de qué modo afecta a la inversión del giro la orientación del elipsoide. Si se pretende ganar un concurso por el número de inversiones de giro de un rattleback hay que buscar el ángulo óptimo entre el eje mayor del cuerpo y el eje longitudinal del elipsoide. Los más osados podrían construir un rattleback suficientemente grande como para montarlo; si les saliera uno con una inversión de giro vigorosa, montarlo sería como cabalgar sobre un potro salvaje.

Cambiemos ahora al tipo Tippe Top, o Peonza Tippe, que invierte también inesperadamente su giro. Este modelo suele tener la parte inferior esférica y un vástago central. Se la hace bailar como si fuera un trompo corriente sobre una superficie plana. La sorpresa llega cuando la peonza gira sobre su extremo esférico sólo durante unos segundos y, luego, cabecea boca abajo, dando vueltas sobre su vástago. El movimiento parece violar la ley de la conservación de la energía, ya que la peonza levanta su centro de gravedad (que se encuentra en la parte esférica) sin ayuda exterior.

La peonza ha fascinado durante largo tiempo a los observadores, eminentes físicos y matemáticos incluidos. En un reciente trabajo de Richard J. Cohen, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, describe cómo William Thomson (genial físico conocido con el sobrenombre de Lord Kelvin) perdía el tiempo haciendo girar piedras pulimentadas sobre la playa, en lugar de preparar sus exá-

menes de matemáticas en la Universidad de Cambridge. Más tarde Niels Bohr, quien desarrolló el primer modelo moderno del átomo de hidrógeno, se sintió igualmente atraído por la mecánica de la peonza de Tippe.

La sorprendente inversión de la peonza se origina debido al rozamiento entre la misma y la superficie sobre la cual gira. Supongamos que gira con su vástago inclinado respecto al eje vertical, como puede apreciarse en la figura de la página anterior. Debido a su giro, aparece una fuerza de rozamiento deslizante (perpendicular al plano de la página en la figura). Esta fuerza origina un par respecto al centro de gravedad, que causa la inversión de la peonza.

Podemos fabricar una peonza de Tippe cortando parte de una pelota de goma maciza e introduciendo un perno en la superficie plana. Un típico aro de niño con una piedra pulida desarrolla el mismo tipo de inversión; basta, para ello, hacer girar el aro en la piedra. Un huevo duro al que se hace girar en posición longitudinal llegará a levantarse para girar sobre uno de sus extremos (en realidad es una de las formas de saber si está bien cocido). Sin embargo, un huevo crudo no se levantaría debido al movimiento de su líquido interno.

En la Feria Internacional de Ciencia e Ingeniería celebrada este año en San Antonio, Texas, hubo varios proyectos que trataban temas discutidos recientemente en esta sección. En la sección de física, David Kirk, de Edmond, trató de determinar si el agua inicialmente caliente podría, bajo determinadas circunstancias, congelarse mucho antes que la inicialmente templada. Sus resultados fueron, como los míos, muy variados, pero éstos parecían indicar que con recipientes destapados se puede demostrar el efecto. Joella Carr, de Winchester, estudió la flotación de gotas de agua sobre la superficie de una masa de agua, confirmando que la vibración de dicha masa prolonga la duración de las gotas durante diez minutos más o menos.

En la sección de química se ofrecieron investigaciones sobre reacciones químicas oscilantes. Helen Rumels, de Baton Rouge, estudió la periodicidad de la reacción de Belousov, llegando a la conclusión de que aumentando la concentración de cerio de 0 a 10^{-4} molar se podía incrementar el período de la triple reacción. También expuso que las contaminaciones de cloruro, bromuro o yoduro detenían la oscilación. Su indicador era nitroferroín. William Crooke, de Pensacola, investigó sobre las ondas químicas en una reacción similar. Science Service, 1719 N. Street, Washington, D. C. 20036, vende los proyectos.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DIFERENCIAS DE COLOR

COLOR IN BUSINESS, SCIENCE AND INDUSTRY. Deane B. Judd y Günther Wyszecki. Segunda edición. J. Wiley & Sons, N. York, 1963.

PRINCIPLES OF COLOR TECHNOLOGY. Fred W. Billmeyer Jr. y Max Saltzman. J. Wiley & Sons, N. York, 1966.

COLOR SCIENCE. Günther Wyszecki y W. S. Stiles, J. Wiley & Sons, N. York, 1967.

EL COLOR Y SU MEDICION. Roberto Daniel Lozano. Americalee, Buenos Aires, 1978.

CONDUCTORES DE CADENA LINEAL

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF LOWDIMENSIONAL MATERIALS. Dirigido por Joel S. Miller y Arthur J. Epstein en *Annals of the New York Academy of Sciences,* vol. 313; 29 de septiembre de 1978.

QUASI-ONE-DIMENSIONAL CONDUCTORS. Dirigido por S. Barišič, A. Bjeliš, J. R. Cooper y B. Leontič en *Lecture Notes in Physics,* vols. 95 y 96. Springer-Verlag, 1979.

EL MICROSCOPIO ACUSTICO

ACOUSTIC MICROSCOPY: BIOMEDICAL APPLICATIONS. Ross A. Lemons y Calvin F. Quate en *Science,* vol. 188, n.º 4191, págs. 905-911; 30 de mayo de 1975.

ACOUSTIC IMAGING: CAMERAS, MICROSCOPES, PHASED ARRAYS, AND HOLOGRAPHIC SYSTEMS. Dirigido por Glen Wade. Plenum Press, 1976.

ACOUSTIC MICROSCOPY AT OPTICAL WAVELENGTHS. V. Jipson y C. F. Quate en *Applied Physics Letters,* vol. 32, n.º 12, págs. 789-791; 15 de junio de 1978.

AN ANGULAR-SPECTRUM APPROACH TO CONTRAST IN REFLECTION ACOUSTIC MICROSCOPY. Abdullah Atalar en *Journal of Applied Physics,* vol. 49, n.º 10, págs. 5130-5139; oct. 1978.

LEGIONELOSIS

LEGIONNAIRES' DISEASE: DESCRIPTION OF AN EPIDEMIC OF PNEUMONIA. David W. Fraser, Theodore F. Tsai, Walter Orenstein, William E. Parkin, H. James Beecham, Robert G. Sharrar, John Harris, George F. Mallison, Stanley M. Martin, Joseph E. McDade, Charles Shepard, Philip S. Brachman y el equipo de investigación de campo en *The New England Journal of Medicine,* vol. 297, n.º 22, págs. 1189-1197; 1 de diciembre de 1977.

LEGIONNAIRES' DISEASE: ISOLATION OF A BACTERIUM AND DEMONSTRATION OF ITS ROLE IN OTHER RESPIRATORY DISEASE. Joseph E. McDade, Charles Shepard, David W. Fraser, Theodore F. Tsai, Martha A. Redus, Walter R. Dowdle y el equipo de investigación de laboratorio en *The New England Journal of Medicine,* vol. 297, n.º 22, págs. 1197-1203; 1 de diciembre de 1977.

PONTIAC FEVER: AN EPIDEMIC OF UNKNOWN ETIOLOGY IN A HEALTH DEPARTMENT. I. CLINICAL AND EPIDEMIOLOGIC ASPECTS. Thomas H. Glick, Michael B. Gregg, Bernard Berman, George Mallison, Wallace W. Rhodes, Jr., e Ira Kassanoff en *American Journal of Epidemiology,* vol. 107, n.º 2, págs. 149-160; febrero, 1978.

LA MEMBRANA FOTOSINTETICA

A PARTICLE SPANNING THE PHOTOSYNTHETIC MEMBRANE. Kenneth R. Miller en *Journal of Ultrastructure Research,* vol. 54, n.º 1, págs. 159-167; enero, 1976.

DYNAMIC STRUCTURAL FEATURES OF CHLOROPLAST LAMELLAE. Charles J. Arntzen en *Current Topics in Bioenergetics,* vol. 8, págs. 111-160; 1978.

LOS LAGOS DE LAVA DEL KILAUEA

PETROLOGY OF THE KILAUEA IKI LAVA LAKE, HAWAII. Donald H. Richter y James G. Moore. Geological Survey Professional Paper 537-B, 1966.

THE ERUPTION OF AUGUST 1963 AND THE FORMATION OF ALAE LAVA LAKE, HAWAII. Dallas L. Peck y W. T. Kinoshita. Geological Survey Professional Paper 935-A, 1976.

EVOLUCION DE LOS CROCODILIOS

THE CROCODILIAN SKULL IN HISTORICAL PERSPECTIVE. Wann Langston, Jr., en *Biology of the Reptilia:* vol. 4, dirigido por Carl Gans y Thomas S. Parsons. Academic Press, 1973.

CROCODYLIA. Rodney Steel en *Handbuch der Paläoherpetologie/Encyclopedia of Paleoherpetology:* parte 16, dirigido por Oskar Kohn. Gustav Fischer Verlag, 1973.

THE MORPHOLOGY AND RELATIONSHIPS OF A CROCODILIAN, *ORTHOSUCHUS STORMBERGI,* FROM THE UPPER TRIASSIC OF LESOTHO. Diane S. Nash en *Annals of the South African Museum,* vol. 67, parte 7, págs. 227-329; 1975.

MATEMATICA CONSTRUCTIVISTA

THE FOUNDATIONS OF CONSTRUCTIVE ANALYSIS. Errett Bishop. McGraw-Hill Book Company, 1967.

WHAT IS A REAL NUMBER? John Myhill en *The American Mathematical Monthly,* vol. 79, n.º 7, págs. 748-754; agosto-septiembre, 1972.

A RENAISSANCE OF EMPIRICISM IN THE RECENT PHILOSOPHY OF MATHEMATICS. Imre Lakatos en *Mathematics, Science and Epistemology.* Cambridge University Press, 1978.

JUEGOS MATEMATICOS

ON PACKING SQUARES WITH EQUAL SQUARES. P. Erdös y R. L. Graham en *Journal of Combinatorial Theory, Series A,* vol. 19, n.º 1, págs. 119-123; julio, 1975.

INEFFICIENCY IN PACKING SQUARES WITH UNIT SQUARES. L. F. Roth y R. C. Vaughan en *Journal of Combinatorial Theory, Series A,* vol. 24, n.º 2, págs. 170-186; marzo, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

AN ELEMENTARY TREATMENT OF THE THEORY OF SPINNING TOPS AND GYROSCOPIC MOTION. Harold Crabtree. Longmans, Green and Co., 1909.

A TREATISE ON GYROSTATICS AND ROTATIONAL MOTION: THEORY AND APPLICATION. Andrew Gray. Dover Publications, Inc., 1959.

MECHANICS: LECTURES OF THEORETICAL PHYSICS, vol. 1, Arnold Sommerfeld. Academic Press, 1964.

THE TIPPE TOP REVISITED. Richard J. Cohen en *American Journal of Physics,* vol. 45, n.º 1, págs. 12-17; enero, 1977.

Taller y laboratorio

Llamas en las que el aire se introduce en un gas inflamable en lugar de al contrario

Jearl Walker

Contemplando el familiar espectáculo de la llama producida por un gas al quemarse en el aire, podríamos preguntarnos qué ocurriría si el gas y el aire se intercambiaran, esto es, si se introdujese un chorro de aire en una atmósfera de gas. ¿Podría verse una especie de llama inversa con la misma forma, altura, color y temperatura de la llama normal? Estas cuestiones se le plantearon a Stuart Travis, de Akron, Colorado, quien, con sus investigaciones sobre la llama inversa del aire en una atmósfera de metano, ganó el segundo puesto en la sección de física en la Exposición Internacional de Ciencias e Ingeniería del año pasado. La llama inversa es similar a la normal y sólo muestra algunas diferencias sorprendentes, cuya naturaleza ni Travis ni yo entendemos bien del todo.

Las llamas normal e inversa investigadas por Travis son llamas de difusión. Para que se produzca la combustión debe presentarse una mutua difusión del combustible en el oxidante, y viceversa, en el frente de la llama, zona donde tiene lugar la combustión. En el otro tipo general de llama, llama de gases premezclados, el combustible y el agente oxidante se mezclan antes de que alcancen la ignición, como sucede en los mecheros Bunsen. Las llamas por difusión y las premezcladas pueden ser laminares (esto es, que fluyen suavemente) o turbulentas, en razón de la velocidad de flujo de los gases que intervienen en la combustión. Travis se ha limitado a estudiar las llamas por difusión en régimen laminar. El ejemplo más común de este tipo es la llama de una vela, caso que ya examinamos con detalle en esta sección en el mes de junio de 1978.

Podría pensarse que las llamas laminares por difusión se conocen a fondo, puesto que la llama de las velas ha sido objeto de investigación a lo largo de muchísimo tiempo. No ocurre así. Las llamas son sumamente difíciles de comprender incluso en sus aspectos más generales, no digamos ya en detalle, debido a la amplia gama de fenómenos que en ellas concurren. En su interior tienen lugar una infinidad de reacciones químicas, gran parte de las mismas muy complejas. La luz que emiten se debe tanto a fenómenos químicos como a fenómenos termodinámicos. Los gases se expanden al ser calentados. El calor se transfiere a través de la superficie de la llama de diversas maneras. El flujo tiene tres dimensiones. Además, al investigar sobre la misma llama acabaremos por distorsionarla de forma inexplicable.

Los estudiosos de las llamas se han concentrado sobre algunas de sus características principales: color, forma, distribución de la temperatura y velocidad de la combustión. La velocidad de la combustión es aquella a la cual la llama se propaga en la perpendicular a su frente. La propagación puede ser o bien a través de un gas estacionario o, como sucede en la llama de una estufa, a través de una llama que permanece estacionaria mientras que es el gas el que fluye. Es fácil calcular la velocidad de combustión cuando el frente de la llama es plano; en cambio, cuando el frente es curvo, como ocurre en la mayoría de los mecheros, el tema se complica.

Otra cuestión de interés en el estudio de la llama es la zona de reacción: se trata de la zona donde se mezclan el combustible y el agente oxidante. Parte de la luz que emite una llama se produce por las reacciones químicas que tienen lugar en dicha región. En una llama de difusión normal, la zona de reacción es azul, debido, sobre todo, a las emisiones azules de las partículas excitadas por las reacciones químicas de la región. Si el flujo de combustible se hace suficientemente lento, la llama se torna azul. Ejemplo de este tipo de llama es la de una vela con una mecha muy delgada.

Si aumentamos un tanto el flujo de combustible, comienza a formarse una punta amarilla o blanca en la parte superior de la llama de difusión normal. A medida que crece el nivel de flujo de combustible, aumenta la región blanca o amarillenta, llegando incluso a extenderse por toda la llama relegando a los laterales la zona azul de reacción, de la llama primero, y confinándola finalmente en la región lateral próxima a la base. Las puntas blanco-amarillentas consisten en partículas de carbono que han alcanzado una temperatura tal que les permite emitir radiaciones de forma más o menos continua a lo largo de todo el espectro visible.

La cámara de combustión que Travis empleó en sus investigaciones consistía en un frasco esférico de 500 mililitros colocado boca abajo con la ayuda de un soporte y una abrazadera. El frasco llevaba incorporado a su superficie dos tubos delgados, uno hacia arriba en la parte superior y otro situado lateralmente en el cuello del frasco. El tapón del frasco contenía un tubo que hacía las funciones de mechero. Para conseguir una llama de difusión normal, Travis suministraba metano por el tubo que servía de mechero y aire por el tubo lateral. Para obtener la llama inversa, intercambiaba los suministros. Un pequeño orificio practicado en un lateral del frasco permitía introducir un termopar para medir la temperatura de la llama. A través del tapón, Travis introdujo también dos conductores eléctricos y una resistencia de nicromo que le serviría para iniciar la llama dentro del frasco. Tomaba el aire y el metano de los tanques del laboratorio de su escuela.

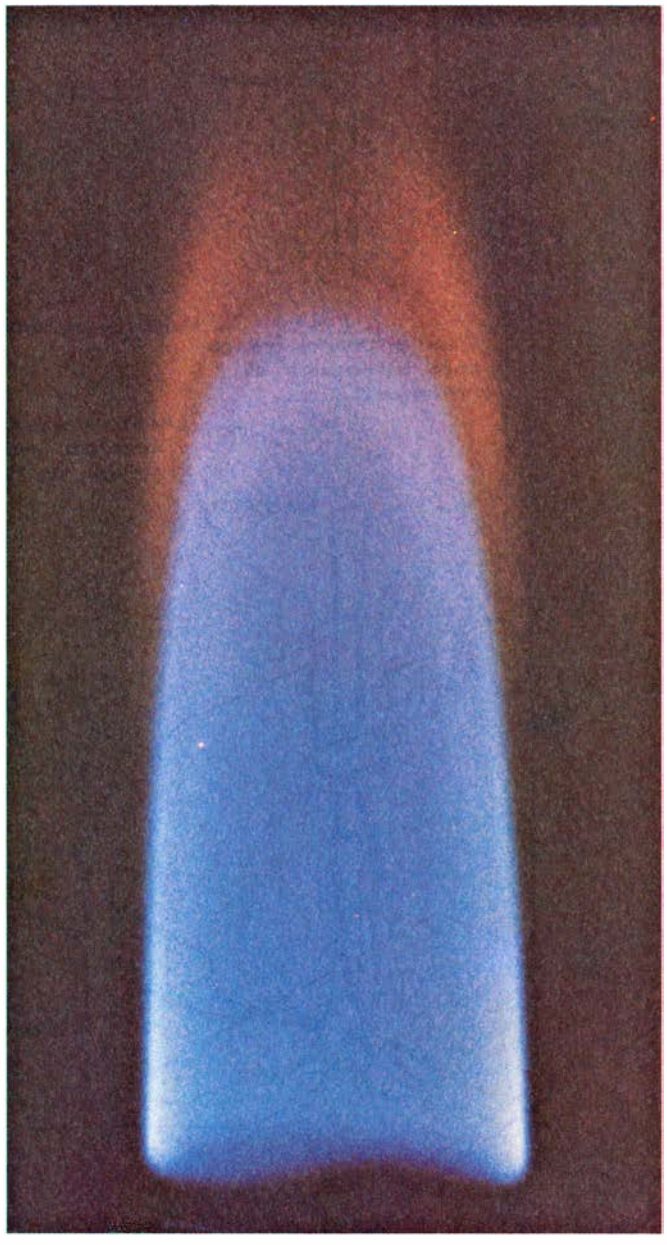
Para encender una llama inversa, Travis colocaba la resistencia de nicromo encima de la boca del tubo que servía de mechero y hacía pasar metano. A los 15 segundos, el frasco estaba lleno de metano y podía encender el gas que salía por el tubo empleado como chimenea de la parte superior del frasco. (Se necesitaban 15 segundos, para evitar que se formara una mezcla con poco de butano y mucho aire que pudiera resultar explosiva). Ajustó el flujo de metano hasta conseguir que la llama, por la chimenea, tuviera unos ocho o diez centímetros de altura. Una vez encendida la

llama inversa dentro de la cámara, la llama de la chimenea quemaba el excedente de metano que salía de la cámara.

El alambre de nicromo estaba conectado, por medio de dos conductores, a una fuente de energía eléctrica que proporcionaba una intensidad suficiente para ponerlo al rojo. A continuación hacía pasar un pequeño flujo de aire (aproximadamente seis litros por minuto). Al principio, la cantidad de aire tenía que ser baja, ya que una gran cantidad de oxígeno podía haber provocado la explosión del frasco. El alambre al rojo prendía la llama en la boca del mechero, con lo que se obtenía la llama inversa. A partir de ese momento, se desconectaban los hilos de la corriente y, moviéndolos desde fuera, los hacía caer de su posición inicial en la boca del mechero. La llama se distinguía mejor en la oscuridad; por eso, la mayoría de estas operaciones las hacía en una situación de penumbra. Para apagar la llama, Travis cerraba primero la entrada de aire con el fin de evitar cualquier peligro de explosión.

Nuestro físico encendía la llama normal con un procedimiento parecido. De nuevo, ponía mucho cuidado en evitar encender la llama en la parte superior del frasco en tanto hubiera en el interior del mismo mucho aire y poco metano. Llenaba, primero, el frasco del metano; a continuación, abría la tubería del aire. Antes de apagar la llama, cerraba el paso del aire. Cuando le pregunté sobre el peligro de explosión, me contestó que no había tenido problemas con la llama inversa pero que, con la llama normal, muy de vez en cuando sufría una explosión que le hacía saltar el tapón del frasco. Para evitar un accidente más importante, quien se apreste a, o quiera realizar, un experimento de este tipo debería emplear una careta de protección. Además no conviene usar como cámara de combustión un frasco mayor de 500 mililitros, pues entonces el riesgo de explosión se elevaría.

La distribución de la temperatura en la llama se medía con una sonda termopar, introducida en la cámara de combustión a través de un pequeño agujero. Lijó la punta del alambre del termopar, lo soldó y lo volvió a lijar para que fuese lo más pequeño posible; aún así, la



Llama normal **(izquierda)** *y llama inversa* **(derecha)**

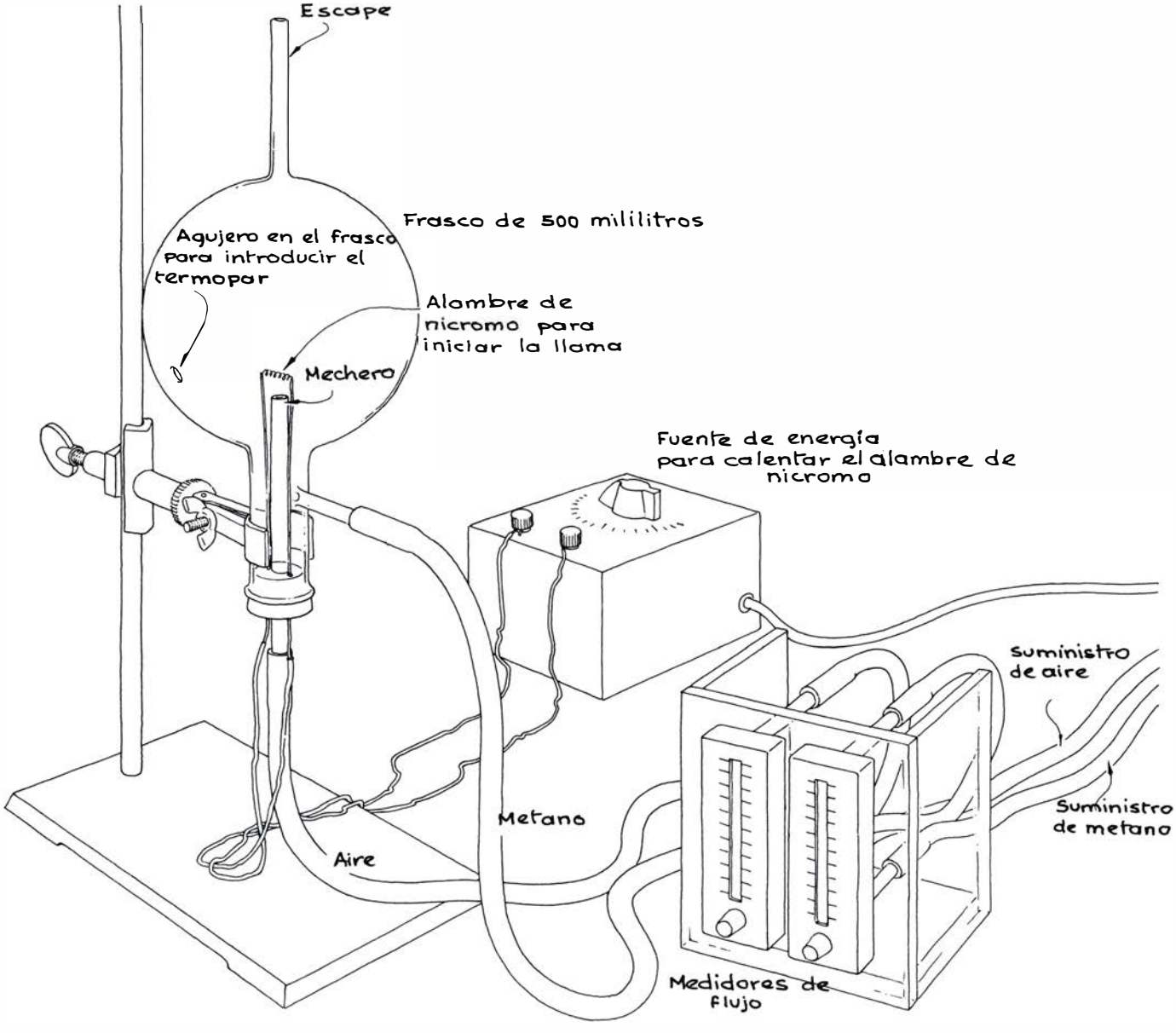
sonda era relativamente grande comparada con la llama y por eso sólo podía medir temperaturas medias. También se debe tener presente dos efectos incuantificables de la sonda: la distorsión de la llama y el enfriamiento que produce y, por tanto, la distorsión que provoca en la distribución de las temperaturas.

Para conocer la posición de la sonda en la llama, Travis montó una regla por fuera de la cámara de combustión de forma que la distancia desde el extremo del termopar al agujero por dentro de la cámara fuera igual a la distancia entre el agujero y la regla; y así, cuando el extremo se desplazaba cierta distancia dentro de la llama, el alambre rígido del termopar se movía un recorrido igual por la regla, con lo cual le era posible medir el desplazamiento en la llama.

Travis calculaba el flujo de gas con dos medidores de flujo relativamente baratos, que trabajaban en el rango de unos pocos litros por minuto. Si los flujos eran muy pequeños, medía de forma aproximada el caudal haciendo burbujear el gas en un recipiente con agua. Contando el número de burbujas por minuto que pasaban a través del agua, y estimando el tamaño medio de las mismas, podía con un simple cálculo conocer el volumen del flujo.

La configuración esférica de la cámara de combustión distorsionaba las fotografías de la llama. Por ello, Travis sustituyó la cámara esférica por otra rectangular hecha con placas de cristal común. Cuando encendía la llama, debía trabajar rápidamente puesto que el calor enseguida rompía el cristal. Evidentemente, podía haber utilizado un cristal más caro, capaz de soportar las tensiones térmicas y entonces se hubiera ahorrado el problema. Para sacar las fotos, Travis empleaba una cámara de 35 milímetros con una lente de 55 milímetros y un anillo de acercamiento. Hizo las fotografías en blanco y negro con una película Kodak Tri-X, una apertura de diafragma de 2,8 y una velocidad de exposición de 1/30 de segundo.

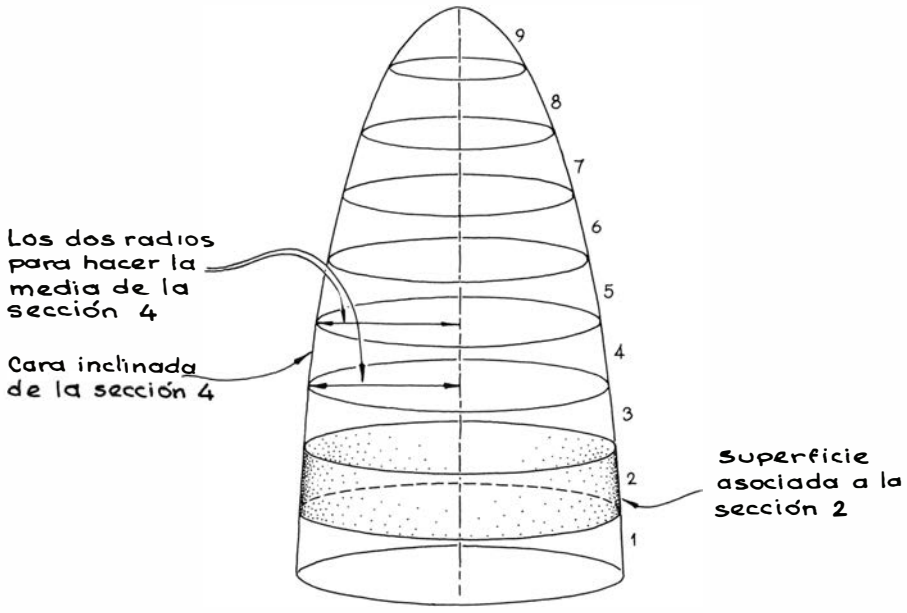
Para medir la velocidad de combustión, el joven físico empleó la técnica conocida como método de Gouy, basado en el área total del frente de la llama. La velocidad de combustión se supone constante en todo el frente de la llama a pesar de la curvatura del mismo. El caudal de gas del mechero es igual al área de la boca del mechero multiplicada por la velocidad del gas en dicha boca (este resultado ha de coincidir con el valor leído en el medidor de flujo). Por ser estacionaria la llama, el caudal de gas debe equivaler también a la velocidad de combustión multiplicada por la superfi-



Cámara de combustión ideada por Stuart Travis para la llama inversa

cie total del frente de la llama. Si la superficie se puede calcular, sólo nos queda como incógnita la velocidad de combustión.

Para determinar la superficie total del frente de la llama, hay que fotografiar la llama y, en la foto, dividir la llama en dos partes iguales por medio de un eje central vertical. Una de las mitades se divide en varias secciones como se indica en la ilustración de la derecha. Dos de los lados de cada una de estas secciones corresponden a los radios desde el eje central hasta el frente de la llama y otra cara es la zona inclinada del frente de llama. La superficie a lo largo de la circunferencia de la llama correspondiente a una de estas secciones se calcula multiplicando el número pi por la media de los dos radios de la sección y por la longitud tomada a lo largo de la superficie inclinada de la llama. El área total obtenida viene a ser el área total del frente de llama.



Cómo seccionar la llama para calcular su superficie

¿Cuál es la exactitud de este cálculo? El cálculo puede resultar falseado por causas varias. Una es que determinar la posición del frente de la llama puede ser difícil si la zona de reacción es muy ancha, como es normal que ocurra en llamas con baja velocidad de quemado. Otra fuente de error proviene de la dificultad de calcular la superficie en la parte superior de la llama, donde el frente de la misma puede estar sustancialmente curvado. Nos puede inducir a cometer un error de bulto el que la base de la llama esté definida pobremente en la fotografía. Y, finalmente, la velocidad de combustión de la llama puede venir distorsionada por la expansión térmica de los gases cuando entran en la zona de reacción y se calientan.

Predecir la forma o altura de una llama de difusión normal tampoco es grano de anís. Ambas cuestiones dependen de una compleja interacción de la transferencia de calor, de la difusión y la velocidad de las reacciones químicas. En un análisis muy simple podría decirse que la altura de una llama de difusión sería directamente proporcional al caudal de gases e inversamente proporcional a la velocidad media de difusión de los mismos.

Las llamas inversas hechas por Travis en su aparato son tan difíciles de analizar como las llamas normales, sino más. Ambos tipos de llamas difieren notablemente en tamaño, y color. Una llama inversa suele tener la parte superior redondeada, no cónica, que es lo que ocurre en una llama normal. Una llama normal con un determinado caudal de metano es mucho más alta que otra inversa con el mismo caudal de aire. La llama normal suele tener una base poco definida, mientras que la llama inversa ostenta una base precisa y definida; además, dicha base está separada de la boca del mechero por un espacio relativamente ancho y muerto.

La razón de diferencia más destacada entre ambas llamas es su color. La normal, producida con un caudal de combustible pequeño, es totalmente azul. A medida que aumentamos el caudal de metano aparece en la parte superior una punta blanca o amarilla y las partes azules se reducen y desplazan hacia la base. Una llama inversa es totalmente azul hasta que se introduce en ella una gran cantidad de aire; a partir de entonces, la punta se torna naranja.

La distribución de temperaturas difiere ligeramente en una y otra clase de llama. La llama normal tiende a mostrar su parte más caliente a los lados del cono interior obscuro; la inversa tiene algunas zonas más calientes por encima del cono interior. Hay que advertir que estas medidas están afectadas por la introducción de la sonda del termopar en la llama y porque el termopar promedia las temperaturas de una región, aunque dicha región sea pequeña.

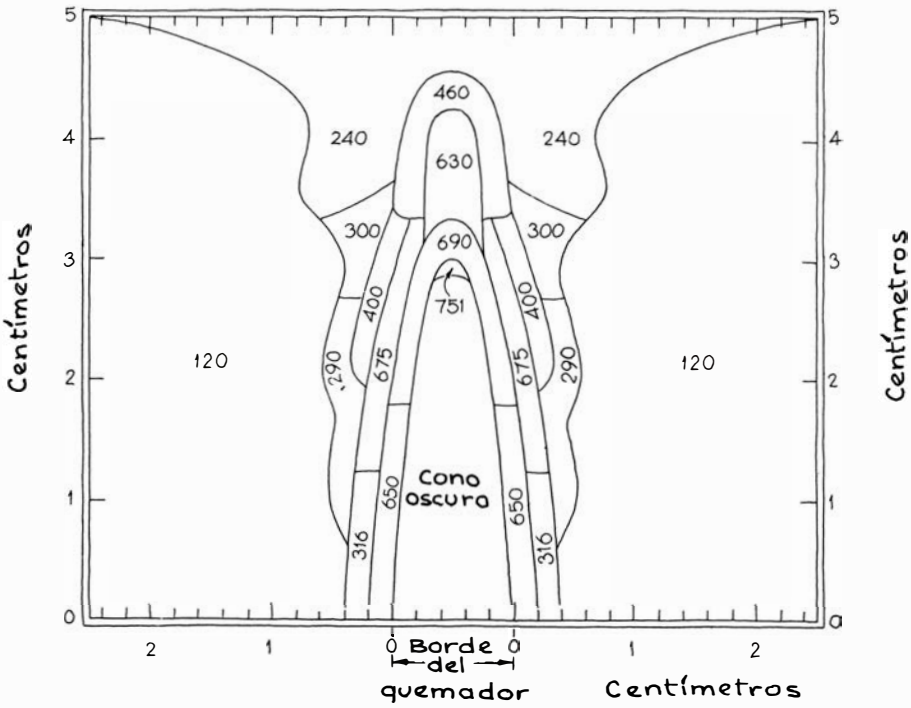
La llama inversa tiene también una velocidad de combustión más alta. Cuando Trevis ajustó una llama normal y una inversa de forma que alcanzaran la misma altura, la llama inversa conseguía alrededor del doble de velocidad de combustión que la normal. Cuando ajustó las llamas a iguales caudales (metano para la normal y aire para la inversa) la relación se acercó a 10. En ambos tipos de llama, la velocidad de combustión descendía (desde unos pocos centímetros por segundo) al aumentar el caudal, ya que el área de la parte anterior de la llama no aumentaba tanto como el caudal.

¿Por qué la llama inversa es diferente de la llama normal? No estoy seguro del todo, pues ni siquiera acaba de conocerse bien el mecanismo de la llama normal de difusión. La llama inversa y la normal se parecen cuando los caudales son bajos. En esa condición, una y otra tienen forma redondeada en la parte superior y color azul en la zona de reacción. Al aumentar el caudal de metano en la llama normal, aparece rápidamente la punta amarilla o blanca. La correspondiente punta naranja de la llama inversa se desarrolla menos deprisa ya que el caudal de aire debe aumentarse considerablemente para provocar su aparición.

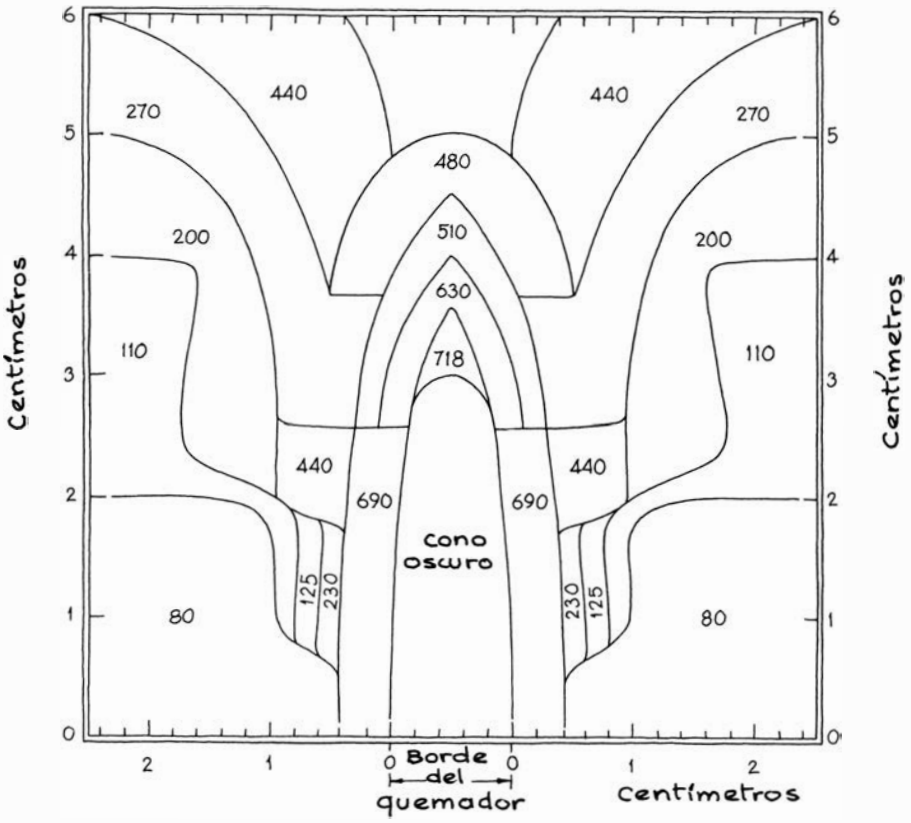
No deja de desconcertarnos que el color de la punta de ambas llamas no sea el mismo. Debe ser (por lo que yo sé) a causa de que en una y otra el color de la punta obedece a las emisiones visibles de partículas de carbono incandescentes. Puesto que la alimentación de aire en la llama inversa ha de ser relativamente alta para provocar la punta naranja, la formación de partículas de carbono incandescente podría requerir también una alimentación de aire relativamente alta.

El hecho de que el metano se difunda desde la parte exterior de la llama inversa, en lugar de hacerlo desde el interior, como sucede en la llama normal, podría constituir la clave de las diferencias entre los dos tipos. El metano nece-

sita para su descomposición una temperatura apreciablemente alta. Si este gas proviene de la parte interior de la llama, penetra en las partes más calientes de la misma muy rápidamente. No se conocen los mecanismos por los cuales se terminan formando partículas sólidas de carbono, aunque se sospecha que el proceso no queda completado hasta que los gases alcanzan la parte superior de la llama. Cuando el metano se difunde en una llama inversa, entra por la parte más fría y se calienta gradualmente; ello justifica que las reacciones que forman las partículas puedan ser diferentes. Sin embargo, mis especulaciones en estas cuestiones son puras suposiciones en espera de que se hagan más trabajos sobre las llamas inversas.



Temperaturas (en grados Celsius) en torno a una llama normal



Temperaturas en torno a una llama inversa

Una llama normal de difusión que sea estable se asentará ligeramente encima de la abertura de un quemador a una altura en que la velocidad de combustión iguala la velocidad del gas. Si una de las velocidades cambia de una forma significativa, la llama se moverá, ya sea alejándose de la boca o introduciéndose en ella. La velocidad del gas disminuye algo, a medida que la corriente del mismo se difunde desde la boca del mechero, de suerte que el frente de la llama se asiente en aquel punto por encima de la boca en que ambas velocidades se igualan. Algunas llamas (como las de chorros de etileno) pueden elevarse bastante por encima del quemador y estabilizarse por algún tiempo. No es fácil obtener este tipo de llamas elevadas, pues requieren un equilibrio perfecto entre la velocidad del gas y la velocidad de combustión, para el experimentador.

Travis no logró que su llama normal se levantara de esta forma, pero lo consiguió fácilmente con la llama inversa. Cerraba la alimentación de metano y rápidamente la volvía a abrir. La llama se elevaba varios centímetros por encima de la boca del quemador, permaneciendo así hasta cuatro minutos. Aunque no estoy seguro de dónde estriba la razón de ese comportamiento de la llama inversa, sospecho que quizá la relativamente alta velocidad de combustión pudiera ser la clave.

Cuando en una llama normal se abre mucho la alimentación de metano, ésta se vuelve turbulenta. La llama inversa no manifiesta tal turbulencia. Al abrir mucho su alimentación, la llama se aleja de la boca del mechero y se apaga.

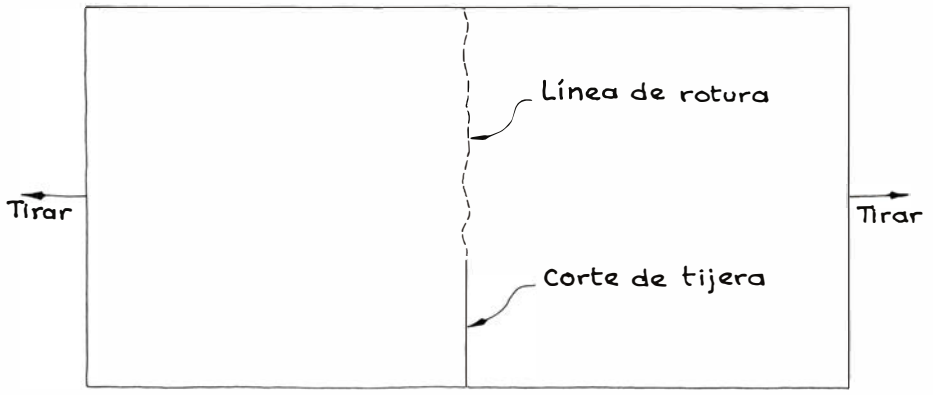
No hallé mención alguna de llamas inversas en la bibliografía pertinente. Quizá sea Travis la primera persona que las ha investigado. Si se desea proseguir su estudio, habrá que insistir en la experimentación. Intentar, por ejemplo, con otros hidrocarburos gaseosos distintos del metano (se debe tener precaución si son tóxicos o altamente explosivos). Travis ensayó también con propano. Se puede empezar por ahí. En mi anterior artículo sobre la llama de una vela, descubrí de qué manera un simple espectroscopio puede servir para observar las inversiones de los radicales químicos CH y C_2 de las zonas de reacción. Se podrían hacer observaciones similares en las zonas de reacción de una llama inversa. Si no se observan emisiones, los procesos químicos de las zonas de reac-

ción en ambos tipos de llama serían muy diferentes.

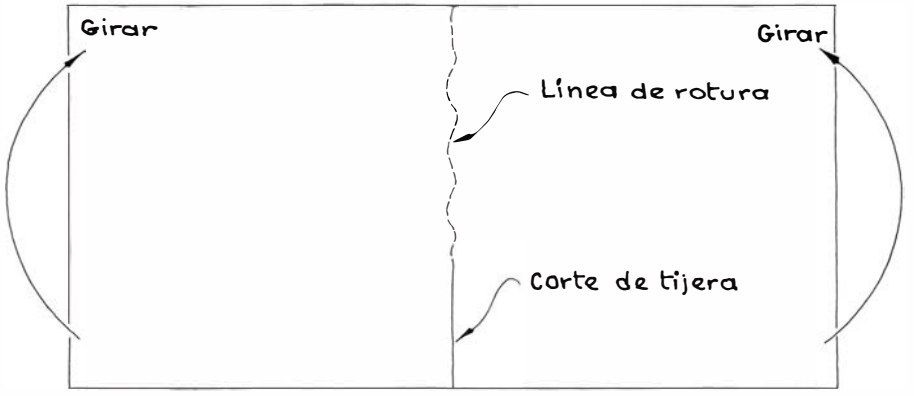
He recibido copiosa correspondencia a propósito de la similitud entre la caída de árboles y chimeneas, que se discutió en esta sección en abril. James D. Plimpton, de Albuquerque, señalaba que un árbol con muchas hojas, en su caída, podía "flotar" brevemente un instante antes de tocar el suelo, debido a la resistencia del aire contra sus ramas. Un aspecto más peligroso de la caída de árboles lo describe Paul R. Burnett, de Temple Hills. A un árbol que va a ser derribado, se le hace una gran muesca en un lado y después un simple corte horizontal en el lado opuesto. Cuando empieza a caer, bascula sobre los dos dedos de madera que quedan entre la muesca y el corte opuesto. Si el árbol es joven, puede combarse apreciablemente por la resistencia del aire según cae; un árbol vivo nunca se quebrará en razón de la gran resistencia a la tensión de la madera verde. Sin embargo, la parte de madera sobre la que bascula, se rompe, lanzando el extremo del árbol hacia arriba con una fuerza considerable. Ese extremo puede moverse entonces en la dirección de caída del árbol, como la base de una chimenea que se derrumba. Si el árbol tiene muchas ramas gruesas, puede almacenarse en ellas mucha energía cuando se arquean al golpear el suelo. Las ramas pueden impulsar bruscamente el tronco hacia el tocón con gran fuerza. Burnett ha visto tocones casi arrancados del suelo por el impacto. Este repentino y violento retroceso es particularmente peligroso para quien está junto al tocón o incluso cerca de él, después de la caída del árbol.

El comportamiento en la caída de un árbol muerto y parcialmente podrido es aún más curioso. John D. Engels, de North Bend, ha observado que la rotura de estos árboles al caer es muy similar a la de las chimeneas. Los árboles muertos y podridos se rompen a veces por la mitad; los dos trozos caen a ambos lados del tocón, siendo un grave dilema para el leñador decidir hacia qué lado correr. Engels ha visto también arquearse al caer árboles con muchas hojas verdes. Algunas veces el árbol se endereza bruscamente al acercarse al suelo, de manera que la mitad superior alcanza el suelo antes que la inferior.

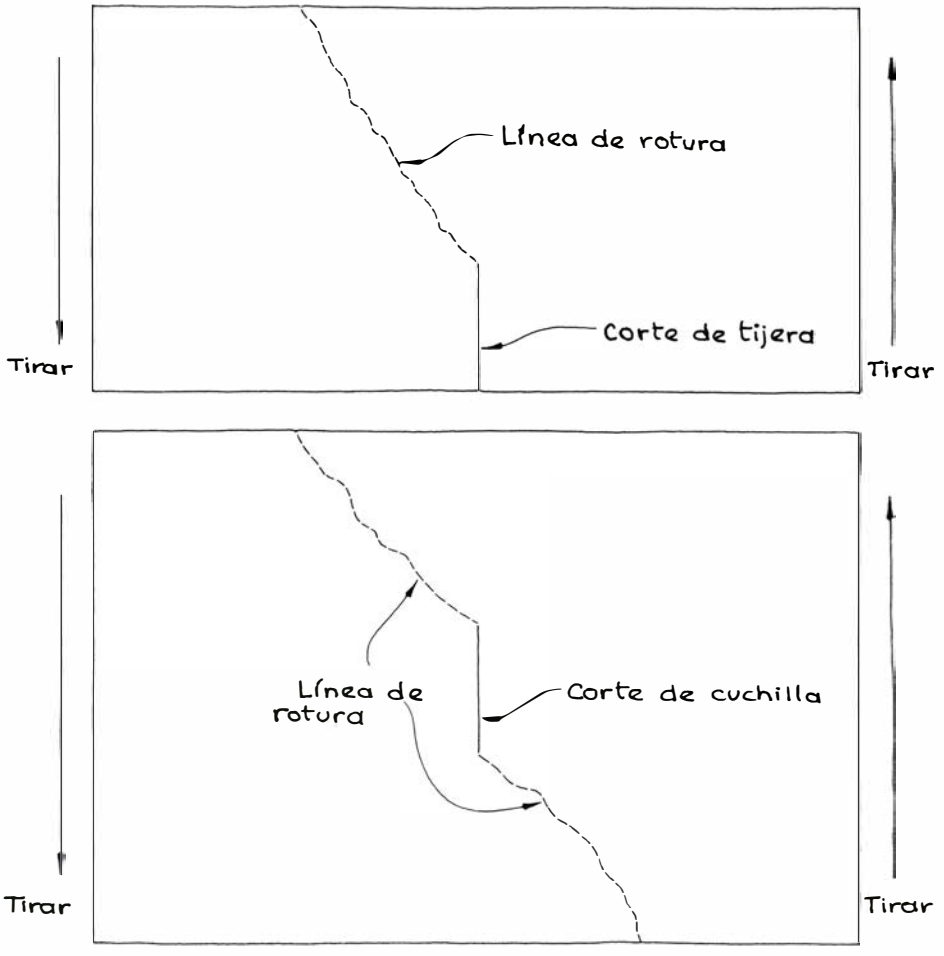
Después de leer mi descripción (en el mismo artículo) de cómo se rompen las puntas de los lápices, Gerard R. Martin, de Napa, me remitió la descripción de un extraño efecto que habían observado unos alumnos de química con agitadores de cristal. Si una de estas varillas



Modo de fractura mixto. Modo I: Esfuerzo puro de tensión



Modo I: Esfuerzo puro de pandeo



Modo II: Propagación de una rotura por cizalla

caía, se rompía frecuentemente en tres trozos de longitudes iguales y unas pocas astillas. Este modelo de rotura fue apellidado "regla de pi", pues las varillas se rompían aproximadamente en 3,1 partes. Martin y otros matemáticos generalizaron el resultado (como suelen hacer los matemáticos) incluyendo barras de tiza. ¿Existían otros ejemplos de la regla de pi?

Comprobé esta regla dejando caer trozos de tiza en el suelo, después de marcarlos de manera que pudiera reconstruirlos y situar el punto de impacto. Aunque la regla no se observaba con exactitud milimétrica, la tiza solía romperse en tres partes (rara vez de la misma longitud) con fracturas similares a las de las minas de lápiz. Mi trabajo obtuvo distintos comentarios de mis colegas de la Universidad del estado de Cleveland. Karl Casper descubrió que si se reduce la longitud de la tiza en un tercio, se romperá por lo general en dos partes, y no en tres. Bien podría suceder que una pieza de tiza se rompiera primero a un tercio aproximadamente de su longitud total y los restantes dos tercios lo hicieran aproximadamente por la mitad, cuando la parte superior golpeara el suelo un instante después. Se puede intentar hacer fotografías de alta velocidad para averiguar si mi elucubración está fundada o si la pieza entera de tiza vibra y se rompe por dos sitios a la vez.

Otro ejemplo de fracturas, que en principio parece no tener relación con los anteriores, me lo mandó J.G. Nandris, de la Universidad de Londres. Alrededor del año 2000 a.C. se erigió un menhir (o monolito vertical) enorme, Le Grand Menhir Brisé, en Carnar. La piedra medía 21 metros de altura y pesaba más de 300 toneladas. No se comprende cómo hombres con herramientas primitivas pudieron construirlo y levantarlo. La piedra permaneció de pie hasta hace cerca de 700 años, en que se vino abajo y se partió en cuatro trozos. La mitad superior descansa actualmente en tres partes alineadas hacia el Noroeste, después de haber caído, al parecer, en una dirección casi opuesta a la tomada por la mitad superior.

¿Por qué cayó la piedra? ¿La partió un rayo o fue derribada por los indígenas? ¿Por qué cayeron las dos mitades en direcciones opuestas? Lo más probable es que la derribara un terremoto que la cortó por la mitad. Cuando la parte superior cayó al suelo se rompió en tres trozos, de forma semejante a las barras de tiza que yo tiraba. Las superficies de las roturas de las cuatro piezas recuerdan las porciones de las tizas. La mitad inferior de la piedra continuó sobre el trémulo suelo (si realmente fue derribada por un terremoto) hasta que también cayó, pero lo hizo en una dirección diferente de la otra mitad. Tanto el menhir como el terremoto que lo destrozó debieron ser pavorosos.

El tipo de fractura común en las minas de lápiz, chimeneas, tizas e incluso el del menhir, se denomina fractura de tipo mixto, pues incluye dos modos generales de fractura, según me explicó recientemente Anthony R. Ingraffea, de la Universidad de Cornell. Las ilustraciones de la página anterior enseñan cómo cortar y rasgar hojas de papel para demostrar esos modos. Se origina una fractura del tipo llamado modo I, cuando el material se somete a esfuerzos puros de pandeo o de tensión, ninguno de los cuales puede ser causa de que los dos trozos resultantes de la fractura deslicen uno sobre el otro. Para demostrar este fenómeno no hay más que hacer un corte en una hoja de papel y tirar o hacer girar los extremos según se indica en las dos ilustraciones superiores de esa página. La rotura se propaga en una línea recta, paralela al corte realizado.

Si deslizamos, una sobre otra, ambas fracciones del corte, sin que lleguen a separarse, la rotura pertenece al modo II. Córtese las hojas de papel según se indica en la ilustración inferior de la página y tírese en sentidos contrarios, según convenga. La rotura esta vez se propaga de una forma curvilínea.

Las roturas que se propagan a lo ancho de una chimenea que cae o de una mina de lápiz bajo esfuerzo son del tipo mixto: pandeo (modo I) y cizalla (modo II). Por tanto, la rotura muestra algo de ambos modos de fractura. La dirección en la cual la rotura se curva durante la última parte de la propagación es diferente en las chimeneas y en las minas de lápiz, debido a la dirección de la cizalladura. Por ejemplo, si la chimenea cae hacia la izquierda, la cizalladura en sentido de las agujas del reloj hace que la rotura se curve hacia abajo, según pasa a lo ancho de la chimenea. En una mina de lápiz la dirección de cizalladura desvía la curva de la rotura hacia arriba, lejos del extremo.

Había un error en la ilustración del circuito de amplificación del sismógrafo descrito en esta sección en septiembre. La línea del condensador de 0,4 microfarad al terminal numerado "2" en la segunda puerta debe conectarse a la línea entre la resistencia de un kiloohm y las resistencias de 100 kiloohm.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

REPARACION DEL MATERIAL GENETICO

MOLECULAR MECHANISMS FOR REPAIR OF DNA. Dirigido por Philip C. Hanawalt y Richard B. Setlow. Plenum Press, 1975.

ULTRAVIOLET MUTAGENESIS AND INDUCIBLE DNA REPAIR IN *ESCHERICHIA COLI*. Evelyn M. Witkin, en *Bacteriological Reviews*, vol. 40, págs. 869-907, 1976.

DNA: REPLICATION AND RECOMBINATION. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology, vol. 43, 1978.

CAUSAS DE LA DIABETES

RECEPTORS FOR PEPTIDE HORMONES: NEW INSIGHTS INTO THE PATHOPSYCHOLOGY OF DISEASE STATES IN MAN. Richard C. Eastman y Jeffrey S. Flier en *Annals of Internal Medicine*, vol. 86, nº. 2, págs. 205-219; febrero, 1977.

TYPE I DIABETES MELLITUS. A. G. Cudworth in *Diabetologia*, vol. 14, n.º 5, págs. 281-291; mayo, 1978.

VIRUS-INDUCED DIABETES MELLITUS: ISOLATION OF A VIRUS FROM THE PANCREAS OF A CHILD WITH DIABETIC KETOACIDOSIS. Ji-Won Yoon, Marshall Austin, Takashi Onodera y Abner Louis Notkins en *The New England Journal of Medicine*, vol. 300, n.º 21, págs. 1173-1179; 24 de mayo de 1979.

ALEACIONES CON MEMORIA DE LA FORMA

NITINOL HEAT ENGINES. Ridgway Banks en *Shape Memory Effects in Alloys*, dirigido por Jeff Perkins. Plenum Press, 1975.

SHAPE MEMORY EFFECTS AND APPLICATIONS: AN OVERVIEW. Walter S. Owen en *Shape Memory Effects in Alloys*, dirigido por Jeff Perkins. Plenum Press, 1975.

TEORIA NEUTRALISTA DE LA EVOLUCION MOLECULAR

THEORETICAL ASPECTS OF POPULATION GENETICS. Motoo Kimura y Tomoka Ohta. Princeton University Press, 1971.

MOLECULAR POPULATION GENETICS AND EVOLUTION. Masatoshi Nei. North-Holland Publishing Co., 1975.

STATISTICAL STUDIES ON PROTEIN POLYMORPHISM IN NATURAL POPULATIONS, I: DISTRIBUTION OF SINGLE LOCUS HETEROZYGOSITY. Paul A. Fuerst, Ranajit Chakraborty y Masatoshi Nei en *Genetics*, vol. 86, n.º 2, parte 1, págs. 455-483; junio, 1977.

LACK OF EXPERIMENTAL EVIDENCE FOR FREQUENCY-DEPENDENT SELECTION AT THE ALCOHOL DEHYDROGENASE LOCUS IN *DROSOPHYLA MELANOGASTER*. Hiroshi Yoshimaru y Terumi Mukai en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 76, n.º 2, págs. 876-878; febrero, 1979.

MODEL OF EFFECTIVELY NEUTRAL MUTATIONS IN WHICH SELECTIVE CONSTRAINT IS INCORPORATED. Motoo Kimura en *The Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 76, n.º 7, págs. 3440-3444; julio, 1979.

LAS GALAXIAS PRIMITIVAS

ARE YOUNG GALAXIES VISIBLE? R. B. Partridge y P. J. E. Peebles en *Astrophysical Journal*, vol. 147, n.º 3, págs. 868-886; marzo, 1967.

THE OPTICAL APPEARANCE OF MODEL PRIMEVAL GALAXIES. David L. Meier en *Astrophysical Journal*, vol. 207, n.º 2, págs. 343-350; 15 de julio de 1976.

YOUNG GALAXIES, QUASARS AND THE COSMOLOGICAL EVOLUTION OF EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES. M. S. Longair y R. A. Sunyaev en *Radio Astronomy and Cosmology: International Astronomical Union Symposium No. 74*, dirigido por David L. Jauncey. D. Reidel Publishing Company, 1977.

RECENT THEORIES OF GALAXY FORMATION. J. Richard Gott III en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 15, págs. 235-266; 1977.

ECOLOGIA DEL ESCARABAJO ESTERCOLERO AFRICANO

WHY HAVE SOME ANIMALS EVOLVED TO REGULATE A HIGH BODY TEMPERATURE? Bernd Heinrich en *American Naturalist*, vol. 111, n.º 980, págs. 623-640; julio-agosto, 1977.

ENDOTHERMY IN AFRICAN DUNG BEETLES DURING FLIGHT, BALL MAKING, AND BALL ROLLING. George A. Bartholomew y Bernd Heinrich en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 73, n.º 2, págs. 65-83; abril, 1978.

TEORIA CUANTICA Y REALIDAD

CAN QUANTUM-MECHANICAL DESCRIPTION OF PHYSICAL REALITY BE CONSIDERED COMPLETE? A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen en *Physical Review*, vol. 47, n.º 10, págs. 777-780; 15 de mayo de 1935.

ON THE EINSTEIN PODOLSKY ROSEN PARADOX. J. S. Bell en *Physics*, vol. 1, n.º 3, págs. 195-200; noviembre/diciembre, 1964.

FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS. Dirigido por B. d'Espagnat. Academic Press, 1971.

EXPERIMENTAL CONSEQUENCES OF OBJECTIVE LOCAL THEORIES. John F. Clauser y Michael A. Horne en *Physical Review D*, vol. 10, n.º 2, págs. 526-535; 15 de julio de 1974.

USE OF INEQUALITIES FOR THE EXPERIMENTAL TEST OF A GENERAL CONCEPTION OF THE FOUNDATIONS OF MICROPHYSICS. B. d'Espagnat en *Physical Review D*, vol. 11, n.º 6, págs. 1424-1435, 15 de marzo de 1975; parte 2, vol. 18, n.º 2, págs. 349-358, 15 de julio de 1978.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS. Bernard d'Espagnat. W. A. Benjamin, Inc., 1976.

BELL'S THEOREM: EXPERIMENTAL TESTS AND IMPLICATIONS. John F. Clauser y Abner Shimony en *Reports on Progress in Physics*, vol. 41, n.º 12, págs. 1881-1927; diciembre, 1978.

UN ESTABLECIMIENTO NEOLITICO Y DE LA EDAD DE HIERRO EN UNA COLINA INGLESA

IRON AGE COMMUNITIES IN BRITAIN. Barry Cunliffe. Routledge & Kegan Paul, 1974.

THE IRON AGE IN LOWLAND BRITAIN. D. W. Harding. Routledge & Kegan Paul, 1974.

HILLFORTS: LATER PREHISTORIC EARTHWORKS IN BRITAIN AND IRELAND. Dirigido por D. W. Harding. Academic Press, 1976.

JUEGOS MATEMATICOS

ALGORITHMIC INFORMATION THEORY. G. J. Chaitin en *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21, n.º 4, págs. 350-359, julio, 1977, y errata, vol. 21, n.º 5, pág. 496, septiembre, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

THE OPTICS OF FLAMES. Felix J. Weinberg. Butterworth & Co., 1963.

FLAME STRUCTURE. R. M. Fristrom y A. A. Westenberg. McGraw-Hill Book Company, 1965.

FLAMES: THEIR STRUCTURE, RADIATION AND TEMPERATURE. A. G. Gaydon y H. G. Wolfhard. Chapman and Hall, Ltd., 1970.

Taller y laboratorio

Espectrofotómetro casero que examina el espectro en un treintavo de segundo

Jearl Walker

En esta sección se han presentado diversos diseños de espectroscopios, espectrofotómetros y demás instrumentos válidos para descomponer la luz en sus colores (o longitudes de onda) componentes, permitiendo así su análisis. Los instrumentos eran básicamente de dos tipos; uno para estudiar las propiedades de absorción luminosa de un líquido, sólido o gas transparente, y otro para analizar una fuente de luz, una lámpara o una estrella por ejemplo. Dean Morelli, de Rye, Nueva York, me acaba de enviar un nuevo diseño para un tipo especial de espectofotómetro. Su principal ventaja reside en la velocidad con que barre el espectro visible. Con él se puede obtener un conjunto completo de medidas en menos de un treintavo de segundo.

Para explicar mejor en qué consiste el aparato de Morelli, echaremos un vistazo a los dos tipos fundamentales de espectroscopio y espectrofotómetro. En el primero de ellos, se hace pasar la luz blanca, procedente de una lámpara, a través de una celdilla que contiene el líquido, el sólido o el gas que queremos investigar. La muestra absorbe la luz en unas determinadas longitudes de onda; y así, esa luz disminuye. Se descompone luego (separándola en longitudes de onda) mediante un prisma o una rejilla de difracción antes de incidir sobre un detector. El detector nos permite determinar qué colores de la luz inicial han sido extraídos por la muestra. El observador sabrá identificar los componentes de una muestra y distinguir una muestra de otras que, aunque a simple vista sean iguales, difieran en su composición, si se ayuda de algún manual de espectroscopía molecular y atómica.

El segundo tipo básico de esos instrumentos suele ser de uso familiar en trabajos de astronomía. El espectroscopio se incorpora al telescopio para que el observador defina los colores presentes en la luz procedente de un objeto celeste. Muchos aficionados han analizado, con este procedimiento, la luz solar. El sol emite radiaciones luminosas a lo largo de un rango de longitudes de onda, con la máxima intensidad cerca del centro del espectro visible. Cuando dicha luz, básicamente blanca, atraviesa la atmósfera, los elementos allí presentes absorben la luz de unas longitudes de onda características. Las longitudes de onda absorbidas aparecen como miles de líneas oscuras (las líneas de Fraunhofer), superpuestas a los colores del espectro visible. Con una frecuencia adecuada, el observador logrará identificar las líneas con los elementos presentes en la atmósfera solar.

Un espectroscopio cuenta con el ojo humano para examinar el espectro. Si un aparato sensible a la luz, piénsese en un fotomultiplicador, sustituye al ojo, el instrumento será un espectofotómetro. El experimentador todavía debe ir tomando lecturas de la intensidad de la luz, punto por punto, a lo largo del espectro. Un sistema mejor aún consiste en incorporar al fotomultiplicador un registrador, de suerte que, cuando el fotomultiplicador recorra el espectro, su respuesta quede automáticamente registrada en un papel en forma de curva de intensidad para cada longitud de onda.

Registrar la intensidad de la luz punto por punto, a lo largo del espectro, puede requerir bastante tiempo. Las longitudes de onda se miden en angstrom; el espectro visible tiene 3000 angstrom de ancho. Por tanto, para hacer una medida cada 100 angstrom, será necesario efectuar 31 mediciones. Ello nos llevaría muchos minutos si quisiéramos cubrir el espectro completo. El espectofotómetro de registro rápido de Morelli puede hacer ese trabajo en una fracción de segundo dando, por tanto, al experimentador la oportunidad de investigar los fenómenos de manera mucho más rápida de como lo haría con instrumentos más lentos.

Como ejemplo de capacidad de rapidez de observación, Morelli me contó que él mismo había examinado las oscilaciones de color del oscilador químico que describimos en nuestra colaboración del mes de septiembre de 1978. Aunque el período de oscilación depende de las concentraciones de las sustancias químicas presentes, no suele llegar al minuto. Con un espectofotómetro convencional uno no se puede dar por satisfecho con seguir las oscilaciones en una sola longitud de onda, ya que el aparato nunca le permitirá mantener la velocidad con que se producen las reacciones.

El diseño del instrumento de Morelli puede modificarse en función de las necesidades del experimentador. Pero en líneas generales consta de una lámpara, una red de difracción curvada, un tubo fotomultiplicador y un osciloscopio. Se hace pasar la luz de la lámpara a través de una célula que contiene la muestra a investigar. La red de difracción dispersa la luz en las diferentes ondas que la componen. La red puede desplazarse horizontalmente con el fin de que el tubo fotomultiplicador rastree todo el espectro visible; la intensidad de la luz viene indicada en el osciloscopio. En el eje vertical del osciloscopio se representan las intensidades y, en el horizontal, las longitudes de onda. Por tanto, se ve un gráfico de la intensidad de la luz en función de la longitud de onda. Cuando la célula con la muestra no está en su sitio, en el osciloscopio aparece una línea recta horizontal. En cambio, cuando la célula está colocada, la curva resultante identifica rápidamente las longitudes de onda a las que la muestra absorbió la luz.

Por lámpara, Morelli emplea una lámpara de coche tipo bulbo (como una bombilla ordinaria) de filamento recto. La lámpara se monta en un soporte orientado verticalmente. Aunque está calculada para trabajar a 12 volt, Morelli conecta la lámpara a 21 volt con el fin de obtener la suficiente intensidad y uniformidad a través de todo el espectro visible. (Evidentemente, el potencial mayor acorta la vida de la lámpara.)

La carcasa soporte de la lámpara está hecha con una lámina de acero muy delgada, doblada de forma adecuada. Morelli fabrica siempre la carcasa de dos piezas, de suerte que la lámpara pueda ser cambiada fácilmente. La parte posterior se une a la base principal del espectrofotómetro mediante un soporte en forma de *U*. La parte delantera incorpora un pequeño tubo, a cuyo través pasará la luz. En el extremo delantero de dicho tubo hay una placa plana con dos hojas de afeitar sujetas por cuatro tornillos. El tubo y las hojas de afeitar sirven para evitar que la luz difusa entre en el fotomultiplicador. Con este mismo fin hay otras pantallas colocadas dentro del aparato y éste debe mantenerse en el interior de una caja para impedir que le llegue luz de la habitación.

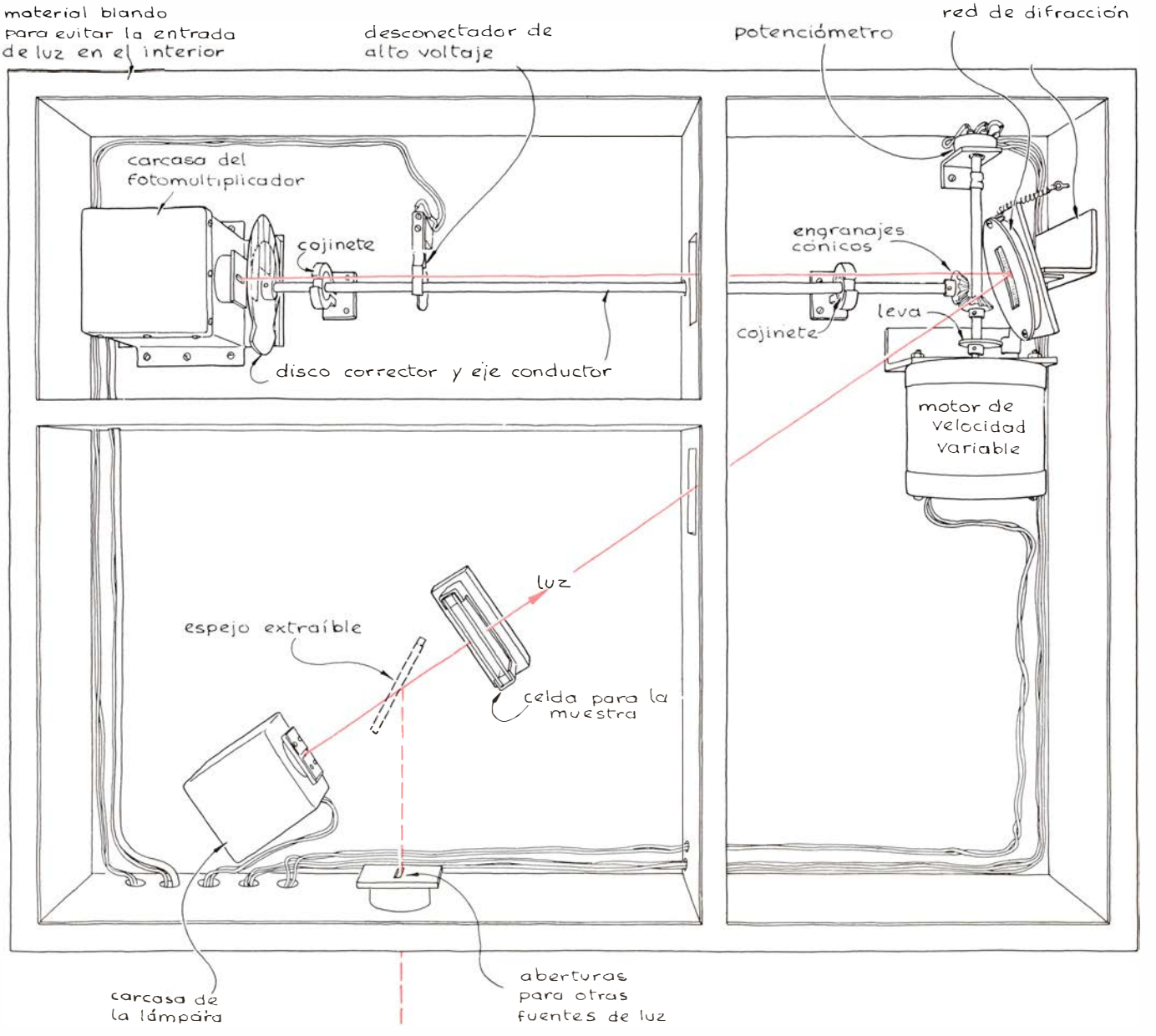
Morelli construyó la célula para la

muestra recortando una pieza en forma de *U* de plexiglás de medio milímetro, emparedándola con dos plaquitas de cristal y pegando las diversas piezas con un sellador de silicona. Como soporte de célula sugiere recortar y doblar una laminita de metal provista de una corredera y atornillarla a un taco de madera. La célula se coloca frente a la luz procedente de la lámpara. En el procedimiento normal de observación de las características de una solución se precisan dos celdas: para el disolvente, con el fin de establecer un patrón, y otra para la solución, que luego podremos comparar con ese patrón.

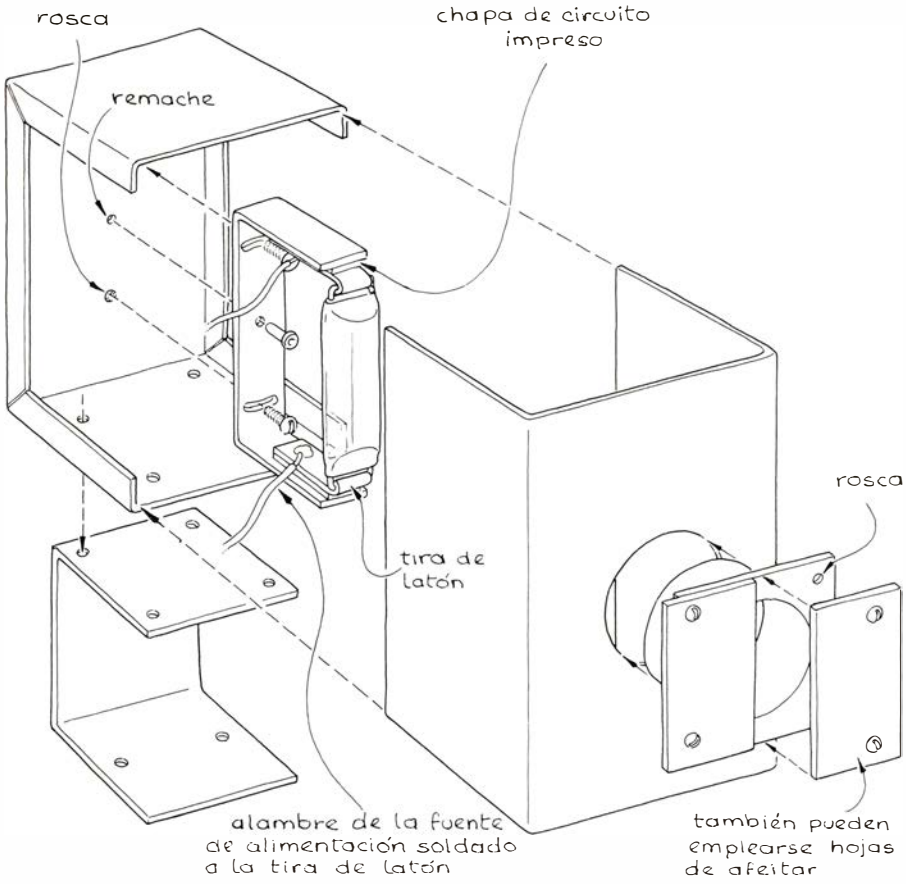
La red de difracción dispersa la luz transmitida a través de la célula con la muestra. Morelli emplea una red de difracción curva, del tipo de las que se encuentran en algunos espectroscopios astronómicos. (Antes de comprar tales redes se aconseja documentarse en las revistas de astronomía.) La red empleada por Morelli tiene un radio de curvatura de 50 centímetros, un área rayada de 3,175 por 4,445 centímetros y una densidad lineal de 1200 líneas por milímetro. Las líneas están situadas de manera que luz con una longitud de onda de 5000 angstrom tenga su máximo de reflexión en el primer orden de difracción. (En este caso, se dice que la red brilla a 5000 angstrom.) Se podrían utilizar otros tipos de redes, pero Morelli evita usar las que tienen un número *f* alto, pues ello comporta que el instrumento pierda sensibilidad. Si se usa una red plana, es necesario colocar una lente para poder proyectar la imagen de la abertura de la carcasa de la lámpara en la abertura del fotomultiplicador (por medio de una reflexión en la red).

La red de Morelli está montada sobre una placa de aluminio provista de una bisagra. De lo que se trata es de permitir que la red oscile horizontalmente alrededor de la bisagra y así barrer el espectro a través del fotomultiplicador. La bisagra está unida a un ángulo de aluminio que se encuentra pegado a la estructura principal del espectrofotómetro. La bisagra debe girar con suave firmeza, sin que llegue a oponer demasiada resistencia al movimiento. Morelli confiesa que probó con varias bisagras antes de encontrar la adecuada.

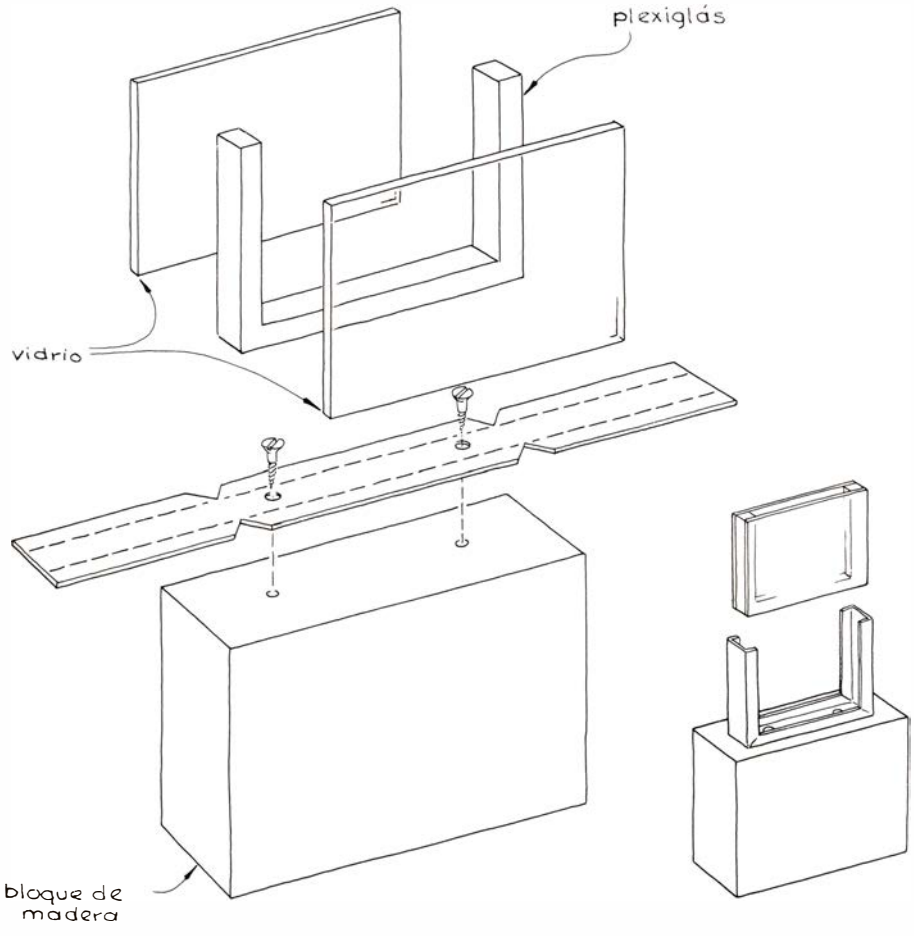
Para el ritmo de observación más alto, la red debería mantenerse de forma que oscilase alrededor del centro. Pero este punto de pivote no suministra el mejor enfoque para todas las longitudes de onda del espectro visible; la mejor distancia focal para una red depende de la longitud de onda. Para conseguir un buen montaje óptico, el punto de pivota-



Espectrofotómetro diseñado y construido por Dean Morelli



Carcasa de la lámpara.



Célula para la muestra con su soporte

ción debería estar desplazado unos seis centímetros del centro de la red. En ese punto, la velocidad de observación es más baja (debido a que la red tiene un momento de inercia mayor que el que tendría un pivote central), pero la mejora en el enfoque merece el sacrificio.

La red está hecha para moverse por medio de una leva que se apoya en un pequeño resalte situado en la placa sobre la que está montada la red. El resalte, en forma de ángulo recto, está sólidamente sujeto a la placa. Mantiene uno de sus extremos contra la leva por presión de un muelle que lleva incorporado la placa. Cuando la leva gira, el resalte se desliza a lo largo de su borde, y fuerza a que la red haga el recorrido horizontal. El muelle asegura que el resalte se mantenga pegado a la leva.

La leva es un recorte de una lámina de latón de dos centímetros. Primero se dibuja sobre un papel con su forma y tamaño reales. Se coloca luego el papel sobre el metal, se vuelve a repasar el dibujo, se recorta el metal por la marca impresa y, por último, se liman los bordes. Lo que se pretende es que la leva arrastre la red en un movimiento dentado, conduciéndola horizontalmente y de modo uniforme hasta alcanzar el final del barrido. Este movimiento se obtiene cuando el radio de la leva varía uniformemente con el ángulo alrededor de su centro. En dicho centro se practica un orificio, de unos 5 milímetros de diámetro, que ajuste con el eje del motor. Morelli soldó a la leva un aro de sujeción de latón procedente de un botón de un tablero de mandos. Esa sujeción solía quedar bajo la cubierta de plástico. El tornillo del aro de sujeción permitía a Morelli que ésta y la leva quedaran unidas con firmeza al eje del motor.

El barrido superior de la velocidad de barrido del espectrofotómetro lo fija la velocidad de oscilación de la red. Si la red va demasiado deprisa, el muelle no puede mantener el resalte contra la leva y el barrido se hace mal. Si se dispone un muelle más fuerte se puede distorsionar la velocidad del motor debido al rozamiento entre el resalte y la leva.

En el lado opuesto a la red y sobre la base del espectrofotómetro se encuentra el fotomultiplicador y su carcasa. Esta es metálica y de poco espesor. En su parte frontal se aplica un tubo metálico soldado o bien pegado con epoxi. Dentro del tubo va otro de diámetro menor. El tubo más pequeño lleva incorporadas unas cuchillas de afeitar de forma que dejen una leve abertura. Como el tubo pequeño es fácil de extraer, el experimentador puede instalar rápidamente aberturas de diferentes tamaños.

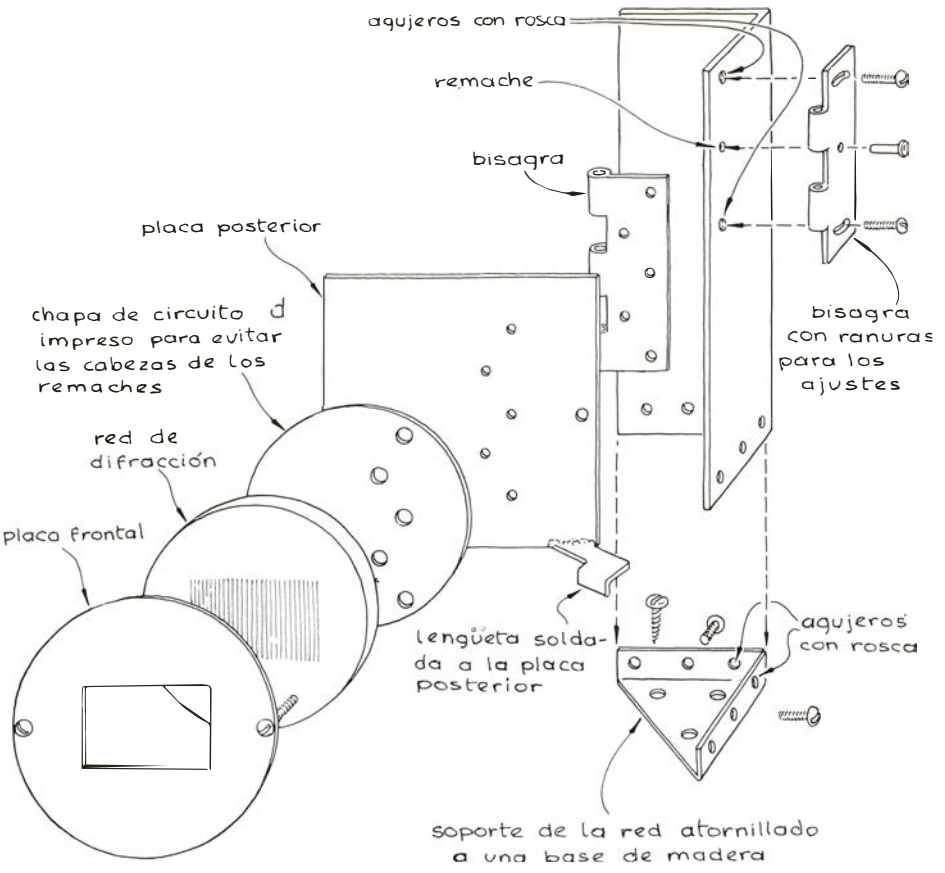
El tubo fotomultiplicador se monta sobre un soporte dentro de la carcasa. Las resistencias necesarias para suministrar la gama de potenciales adecuada al fotomultiplicador se sueldan directamente a éste a través de un agujero que tiene el soporte. Al igual que todas las demás parte metálicas del espectrofotómetro, la carcasa debe ir pintada de negro mate para absorber la luz difusa.

Morelli ha trabajado con varios tipos de tubo fotomultiplicador. El que uno puede comprar depende fundamentalmente de lo que encuentre en el mercado. El modelo 931-A, se consigue fácilmente. Morelli también usa el 1P21, que es un tubo del mismo tipo, sólo que tiene una eficiencia cuántica mayor y una corriente de fondo menor. La eficiencia cuántica indica cuántos electrones emitirá el fotocátodo del tubo por cada fotón que absorba. Si la relación es muy alta, se dice que es muy sensible y que tiene una eficiencia cuántica alta. Se entiende por corriente de fondo la corriente que pasa por el tubo cuando no está llegando luz al fotocátodo. Debe ser baja, pues así no enmascara la señal y en consecuencia no impide las mediciones de bajos niveles de luz. Tanto el tubo 931-A como el 1P21 tienen la superficie fotoeléctrica del tipo denominado S-4, compuesta de cesio y antimonio. Aunque los tubos muestran un rendimiento relativamente alto en la mayor parte del espectro visible, pierden sensibilidad hacia el final del rojo, con un límite en la práctica hacia los 6700 angstrom.

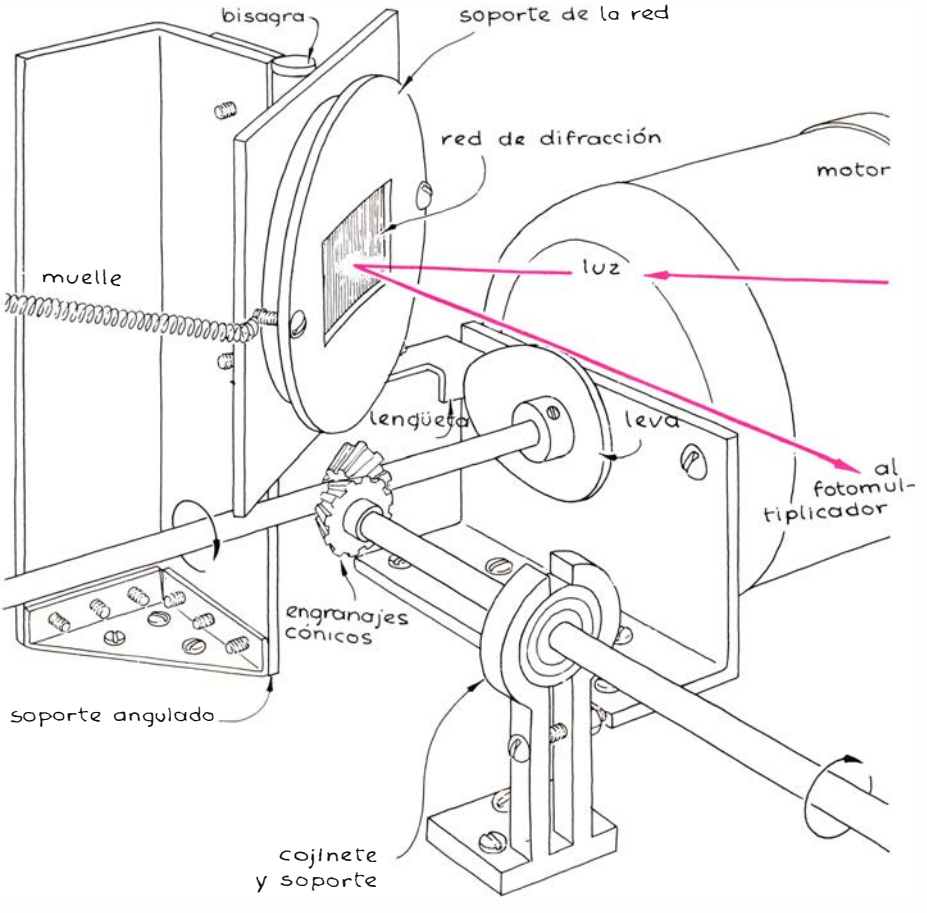
Hay que acertar a la hora de disponer el tubo fotomultiplicador, o lo que es lo mismo, éste tendrá una gama de potenciales adecuada. Morelli emplea una fuente de alimentación regulada que proporciona alrededor de 100 volt por etapa de cada una de las minietapas de su fotomultiplicador 931-A. Para información sobre diseños de fuentes de alimentación se puede consultar cualquier buen manual de radioaficionado.

Recientemente, Morelli probó un fotomultiplicador RCA 4840. Su superficie fotoeléctrica alcalina (llamada S-20) tenía un rango de espectro más ancho que el de su tubo 1P21, siendo sensible a longitudes de onda de hasta 8000 angstrom. El tubo tiene además una cubierta transparente a las longitudes de onda ultravioleta. Con este tubo Morelli logró deflecciones verticales completas en el osciloscopio midiendo la intensidad de la luz en un rango de 3400 a 7000 angstrom.

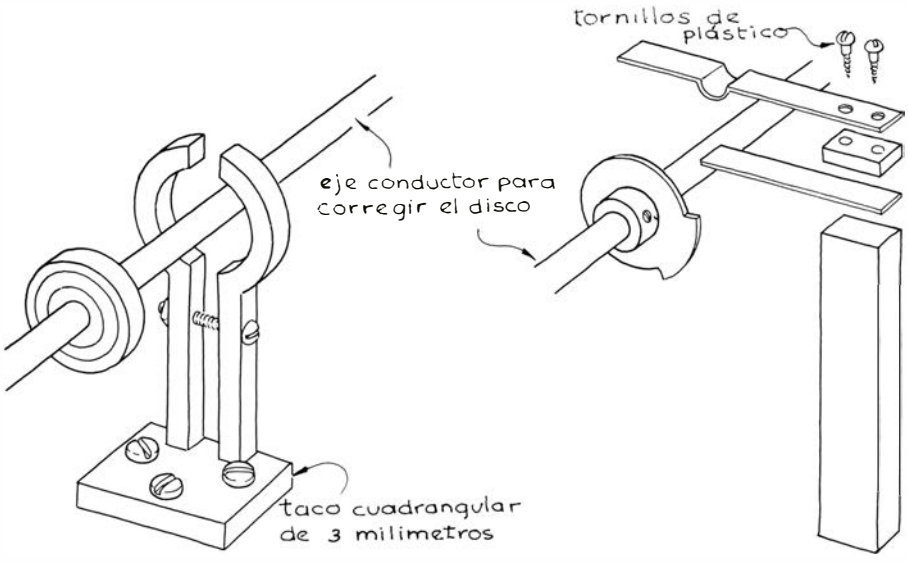
La salida del fotomultiplicador se conecta a la entrada vertical del osciloscopio, que debe tener un amplificador vertical de corriente continua. El brazo del



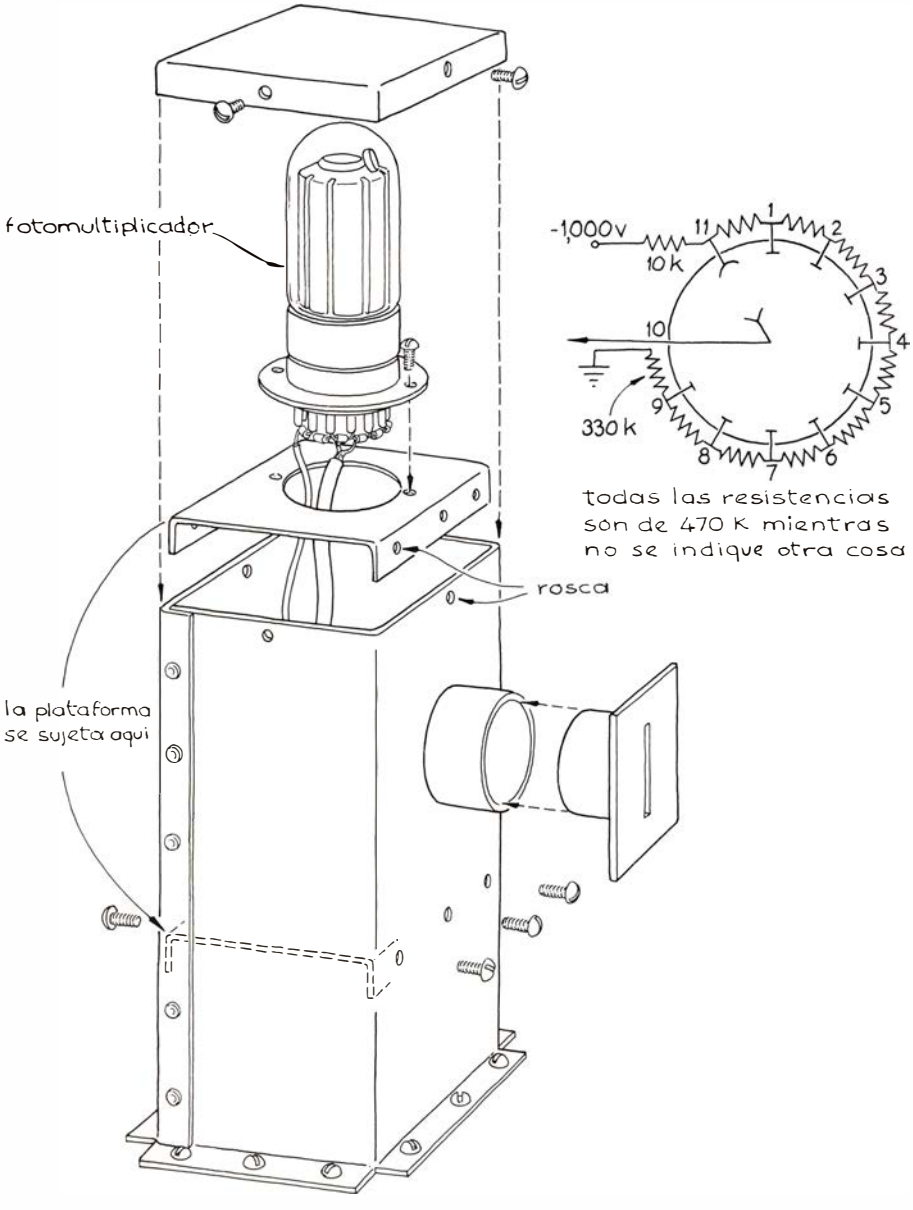
Detalles del montaje de la red de difracción



Modo de montar la red de difracción



Disposición del desconectador de alto voltaje



El fotomultiplicador y su carcasa

osciloscopio debe moverse a través de la pantalla de izquierda a derecha, conforme la red barre el espectro a través de la ranura de entrada del fotomultiplicador. La activación del osciloscopio, para comenzar cada barrido a través de la pantalla, depende del tipo de osciloscopio. Si está provisto internamente de la posibilidad de barrido provocado, la señal de disparo puede obtenerse por una pequeña luz, un disco con ranuras radiales y una fotocélula de silicio. El disco se monta en una prolongación del eje del motor que hace oscilar la retícula. Se sitúa la luz a un lado del disco y la fotocélula, al otro. Cuando la ranura del disco se posiciona correctamente, la luz de la bombilla pequeña incide en la fotocélula cada vez que la retícula comienza otro barrido del espectro a través del fotomultiplicador. La señal de la fotocélula dispara entonces el barrido del trazo del osciloscopio. (Morelli advierte que los osciloscopios baratos no "disparan" con fiabilidad a frecuencias de barrido bajas del espectrofotómetro.)

Se puede montar un sistema mejor para representar la salida del fotomultiplicador, cuando el osciloscopio posee un amplificador horizontal para corriente continua. Se monta un pequeño proyector en un tubo de metal de forma que proyecte la imagen de una ranura sobre una fotocélula de silicio (SM4) al otro lado de una leva torneada adecuadamente. La leva es similar a la que hace mover la red de difracción. Cuando la leva gira, provoca que poco a poco incida una luz sobre la fotocélula. La señal de la fotocélula se amplifica en la entrada horizontal del osciloscopio, mandando el trazo de izquierda a derecha a través de la pantalla. La segunda leva puede montarse en una prolongación del eje del motor de la red para sincronizar el barrido horizontal del osciloscopio con el movimiento de la red.

Si el amplificador de la entrada horizontal del osciloscopio no resultase suficientemente sensible para este sistema, el proyector y la fotocélula podrán sustituirse por un potenciómetro, que proporcionará una señal mayor a la entrada. En esta función, el potenciómetro debe girar continuamente, por lo que se eliminará el diente que impide que gire del todo. El potenciómetro se monta en el eje del motor con un trozo corto de tubo de goma. Una batería de 1,5 volt proporciona el voltaje a través del potenciómetro, cuya salida varía así continuamente de 0 a 1,5 volt, en diente de sierra, cuando el eje hace rotar la conexión interior del potenciómetro. La señal conducirá el trazo del osciloscopio suavemente a través de la pantalla.

Quizá prefiera el lector eliminar el

trazo de retorno del osciloscopio que se mueve a través de la pantalla de derecha a izquierda antes de cada nueva medida de intensidad. Para borrar el trazo de retorno, Morelli instaló un interruptor en el eje motriz, entre la montura de la red y la placa correctora del fotomultiplicador. El interruptor consta de dos láminas de metal, que se separan por una leva situada en el eje durante el período en que el trazo del osciloscopio deba eliminarse. El interruptor se conecta en serie con el hilo que suministra la alta tensión al osciloscopio. Pero puede ocurrir que nuestro experimentador quiera mantener el trazo de retorno del osciloscopio para que sirva como línea de referencia en la pantalla, indicando la línea base de intensidad de luz cero. Dicha línea base puede resultar de particular interés si el osciloscopio posee una fuente de alimentación no regulada, por lo que el trazo tiende a fluctuar.

Si el osciloscopio tiene baja sensibilidad en su entrada vertical, se necesita un preamplificador que aumente la señal del fotomultiplicador. Morelli utiliza amplificador operacional de circuito integrado UA741, de escaso coste, en un circuito realimentado simple, accionado con baterías (suficiente para dar ±15 volt.).

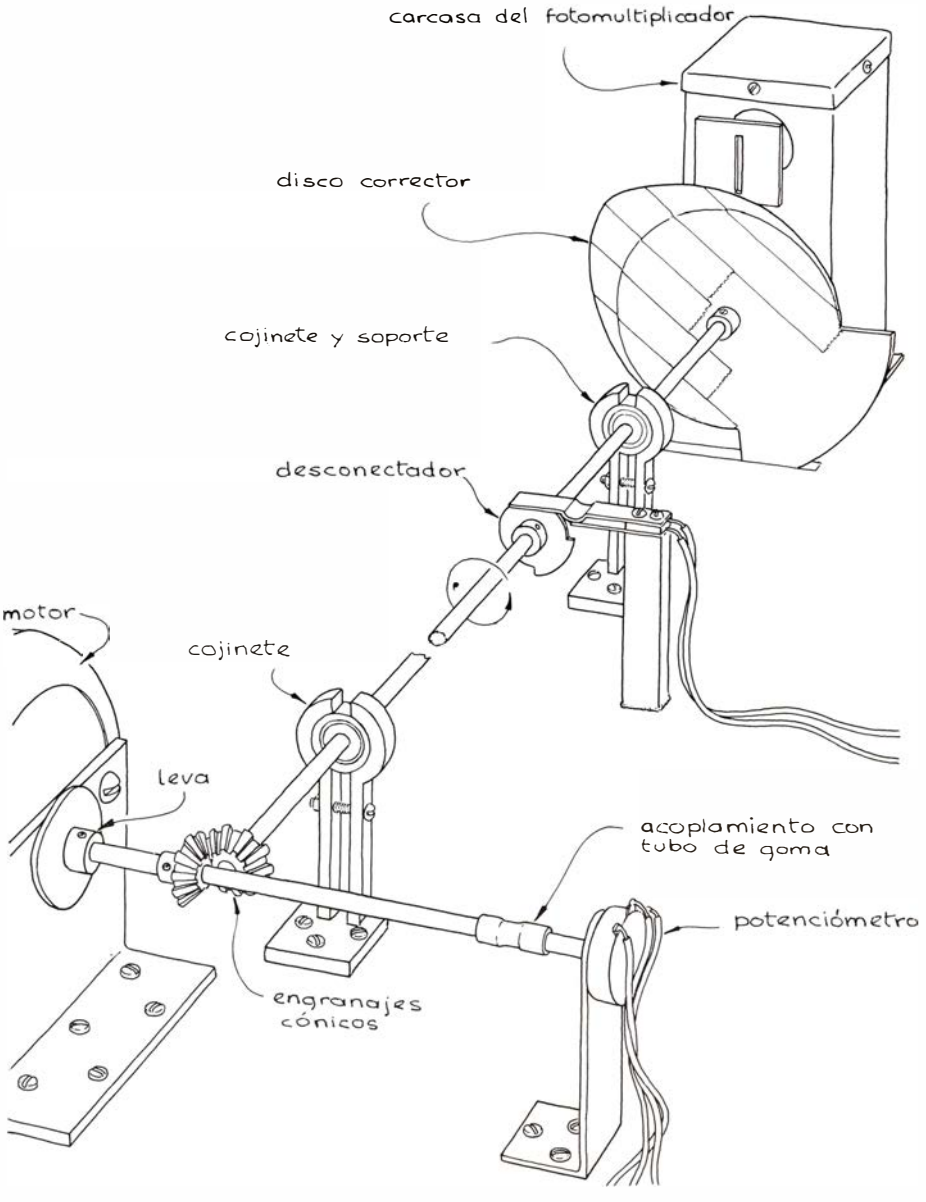
Morelli utiliza su instrumento como se indica a continuación, para determinar las características de absorción de una solución comparadas con las del disolvente puro. Primero consigue el trazo del osciloscopio con el disolvente puro en la célula de la muestra. Incluso en el caso en que el disolvente transmita perfectamente toda la luz, el trazo no será plano, ya que la intensidad de la luz emitida por la lámpara no se mantendrá constante a lo largo de todas las longitudes de onda del espectro visible. Tampoco la respuesta del fotomultiplicador será uniforme a través del espectro. El trazo del osciloscopio dibujará, pues, una línea más o menos acampanada, con su parte superior desapareciendo de la pantalla.

Para compensar estas faltas de uniformidad (y cualquier otra que distorsione la respuesta del instrumento a lo largo del espectro), se construye un disco corrector. Se monta el disco en un eje acoplado, mediante engranajes cónicos, al eje del motor que hace oscilar la red. El disco tiene por misión disminuir selectivamente la luz que incide en el fotomultiplicador a las longitudes de onda que dan un trazo más alto en el osciloscopio. Un disco corrector bien ajustado bloqueará la luz a cada longitud de onda del espectro, de suerte que el trazo sea aproximadamente horizontal en la parte alta de la pantalla. Luego, con un disolvente puro el lector obtendrá un trazo plano en el osciloscopio.

Morelli corta el disco corrector de una chapa de latón. Cuando se monta en el eje motriz, el disco bloquea parte de la luz que incide en la ranura frontal del fotomultiplicador. A continuación, coloca trozos de cinta aislante negra en el borde del disco, al tiempo que hace girar manualmente el eje del motor. Para cada posición del motor la red de difracción manda una determinada longitud de onda sobre la ranura; la desviación vertical del punto en pantalla del osciloscopio corresponde a la respuesta del fotomultiplicador a esa longitud de onda. A cada longitud de onda el punto está desviado inicialmente hacia fuera de la parte superior de la pantalla. Morelli añade un pequeño trozo de cinta adhesiva al disco corrector al objeto de bloquear la luz lo suficiente como para que el punto baje hasta la parte superior de la pantalla. Entonces hace girar suavemente el eje del motor y repite el proceso. Dice que, aunque el sistema es algo tosco, el trazo que resulta en la parte superior de la pantalla es plano con un error de un 5 por ciento.

Cuando la célula que contiene sólo disolvente se sustituye por otra con una sustancia disuelta en ese disolvente, la absorción de la luz por la solución a ciertas longitudes de onda desencadena picos que se extienden hacia la parte inferior de la pantalla del osciloscopio. Si la disolución lograra absorber totalmente la luz a alguna longitud de onda, el pico correspondiente alcanzaría el borde inferior de la pantalla.

La resolución del espectómetro depende de la calidad de la red y de la anchura de la ranura situada delante del fotomultiplicador. Una ranura más estrecha toma una banda más estrecha de longitudes de onda del espectro que la



Montaje del mecanismo de barrido

red lanza a su través. En la posición de la ranura, la anchura del espectro visible completo es de 125 milímetros. Morelli emplea una ranura de unos cuatro milímetros de ancho, que admite por tanto 4/125 (alrededor de 120 angstrom) del espectro completo del multiplicador. El lector puede aumentar la resolución cambiando la ranura de cuatro milímetros por otra más estrecha; en contrapartida, perderá intensidad de luz. Entonces, el fotomultiplicador responderá sólo a la luz de longitud de onda de su rango más sensible (para el tubo 931-A de Morelli, aproximadamente entre 3700 y 6000 angstrom) y se perderá la parte roja del espectro. Con una ranura de cuatro milímetros puede observarse un rango más ancho (3500-6300 angstrom). El límite inferior del rango viene impuesto entonces por la absorción ultravioleta del vidrio de la bombilla, el tubo fotomultiplicador y la célula de la muestra. Otro inconveniente que resulta de las ranuras inferiores a cuatro milímetros de anchura es que quizá necesitarían un movimiento excéntrico de la retícula para evitar el desenfoque en los extremos del espectro.

Morelli calibra su espectómetro poniendo un tubo Geissler de emisión de hidrógeno, en vez de la lámpara acostumbrada. Varias de las líneas del espectro visible emitidas por el hidrógeno (la serie de Balmer) pueden identificarse en la pantalla del osciloscopio. Cuando se pone una ranura de cuatro milímetros las líneas aparecen como picos agudos. Como las longitudes de onda de tales líneas se conocen exactamente, Morelli puede calibrar el eje horizontal del trazo en pantalla, en angstrom.

De intención no me he entretenido en la precisión de las dimensiones del espectofotómetro; Morelli insiste en la necesidad de modificar y ajustar, por parte del experimentador, el diseño básico para adecuarlo al tipo de equipo que haya sido capaz de reunir para construir el instrumento. Los alojamientos del fotomultiplicador y de la lámpara deben estar tan cerca como sea posible. Morelli sugiere una forma de determinar las distancias adecuadas entre la lámpara, el fotomultiplicador y la red. Colocar en una mesa un tubo Geissler, la red y una ranura. Con las luces de la habitación apagadas y el tubo encendido desplazar los tres objetos por la mesa hasta que el espectro quede bien enfocado sobre la ranura. Las distancias así determinadas pueden servir de guía para la construcción del espectrofotómetro.

A la hora de recurrir al espectrofotómetro para examinar las características del espectro de fuentes externas de luz, como lámparas o llamas, se monta un espejo en el instrumento delante de la lámpara. La luz de la fuente externa entra a través de un agujero a un lado de la caja que aloja el espectrofotómetro y se dirige hacia la red mediante el espejo. La fuente ha de ser relativamente brillante para que no se pierda el extremo rojo del espectro por causa de baja sensibilidad del fotomultiplicador en este extremo.

Las aplicaciones posibles al espectrofotómetro de barrido rápido de Morelli son numerosas. Además de las reacciones químicas oscilantes que ya hemos mencionado, hay otros fenómenos ópticos, casi innumerables, que cambian con excesiva rapidez para cualquier espectofotómetro que necesite examinar, a base de mediciones punto por punto a través del espectro visible. Morelli, por ejemplo, pretende examinar la fosforescencia de algunos cristales.

Algunos astrónomos aficionados podrían mostrarse interesados en analizar la composición del espectro de la luz solar. Morelli utiliza un telescopio y un espejo para proyectar la imagen del sol en un agujero de alfiler instalado provisionalmente en lugar de la ranura lateral de la caja que aloja el espectrofotómetro. Mueve la imagen del sol a través del agujero, y así consigue registros en su osciloscopio de espectros de distintas zonas del sol. Podemos sacar observaciones similares con otros objetos celestes, pero debido a la menor intensidad de su luz, el espectrofotómetro con el modelo básico de Morelli respondería principalmente a las longitudes de onda a las cuales el fotomultiplicador se muestra más sensible.

Morelli no ha dejado de trabajar sobre su instrumento. Su próximo gran cambio será reemplazar el sistema mecánico de registro del diseño actual por otro totalmente electrónico, basado en un vidicón (un tubo almacenador de imágenes). Este sistema será más sensible porque la señal del osciloscopio estará formada por el almacenamiento de información de muchos registros. Sería, por ello, mejor para el análisis espectral de la luz procedente de fuentes débiles, tales como cristales fosforescentes. Morelli podrá examinar fenómenos ultrarrápidos: el fogonazo de una lámpara de flash de alta velocidad. El vidicón es más sensible en el extremo rojo del espectro, de manera que el instrumento no tendrá uno de los defectos de los basados en el fotomultiplicador. Morelli está construyendo ahora un espectofotómetro de registro rápido con un tubo de vidicon de los que se usan en circuitos cerrados de televisión en blanco y negro.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA PROXIMA GENERACION DE ACELERADORES DE PARTICULAS

PROTON–PROTON INTERSECTING STORAGE ACCELERATOR FACILITY ISABELLE AT THE BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY. H. Hahn, M. Month y R. R. Rau, en *Reviews of Modern Physics,* vol. 49, n.º 3, págs. 625-679; julio, 1977.

DESIGN STUDY OF A 22 TO 130 GeV $e^+ e^-$ COLLIDING BEAM MACHINE (LEP). The LEP Study Group, European Organization for Nuclear Research, 1979.

FANTASIES OF FUTURE FERMILAB FACILITIES. R. R. Wilson, en *Reviews of Modern Physics,* vol. 51, n.º 2, págs. 259-273; abril, 1979.

BIOLOGIA CELULAR DEL ENVEJECIMIENTO HUMANO

CURRENT THEORIES OF BIOLOGICAL AGING. Leonard Hayflick, en *Federation Proceedings,* vol. 34, n.º 1, págs. 9-13; enero, 1975.

THE CELL BIOLOGY OF HUMAN AGING. Leonard Hayflick, en *The New England Journal of Medicine,* vol. 295, n.º 23, págs. 1302-1308; 2 de diciembre de 1976.

HANDBOOK OF THE BIOLOGY OF AGING. Dirigido por Caleb E. Finch y Leonard Hayflick. Van Nostrand Reinhold Co., 1977.

TIME, CELLS, AND AGING. Bernard L. Strehler. Academic Press, 1977.

THE BIOLOGY OF SENESCENCE. Alex Comfort. Elsevier North-Holland, Inc., 1979

RESERVAS URANIFERAS MUNDIALES

A SECOND IRON AGE AHEAD? Brian J. Skinner, en *American Scientist,* vol. 64, n.º 3, págs. 258-269; mayo-junio, 1976.

SHORT COURSE IN URANIUM DEPOSITS: THEIR MINERALOGY AND ORIGIN. Dirigido por M. M. Kimberley, Mineralogical Association of Canada. University of Toronto Press, 1978.

URANIUM DISTRIBUTION IN MINED DEPOSITS AND IN THE EARTH'S CRUST. Kenneth Deffeyes e Ian Mac-Gregor. U.S. Department of Energy, Grand Junction, Colo., agosto, 1978.

LOS SATELITES GALILEANOS DE JUPITER

MELTING OF IO BY DISSIPATION. S. J. Peale, P. Cassen y R. T. Reynolds, en *Science,* vol. 203, n.º 4383, págs. 892-894; 2 de marzo de 1979.

INFRARED OBSERVATIONS OF THE JOVIAN SYSTEM FROM VOYAGER 1. R. Hanel, B. Conrath, M. Fraser, V. Kunde, P. Lowman, W. Maguire, J. Pearl, J. Pirraglia, R. Samuelson, D. Gautier, P. Gierasch, S. Kumar y C. Ponnamperuma, en *Science,* vol. 204, n.º 4396, págs. 972-976; 1 de junio de 1979.

THE JUPITER SYSTEM THROUGH THE EYES OF VOYAGER 1. Bradford A. Smith, Laurence A. Soderblom, Torrence V. Johnson, Andrew P. Ingersoll, Stewart A. Collins, Eugene M. Shoemaker, G. E. Hunt, Harold Masursky, Michael H. Carr, Merton E. Davies, Allan F. Cook II, Joseph Boyce, G. Edward Danielson, Tobias Owen, Carl Sagan, Reta F. Beebe, Joseph Veverka, Robert G. Strom, John F. McCauley, David Morrison, Geoffrey A. Briggs y Verner E. Soumi, en *Science,* vol. 204, n.º 4396, págs. 951-972; 1 de junio de 1979.

VOYAGER 1 ENCOUNTER WITH THE JOVIAN SYSTEM. E. C. Stone y A. L. Lane, en *Science,* vol. 204, número 4396, páginas 945-948; primero de junio de 1979.

ILUSIONES GEOMETRICAS

A DEPTH PROCESSING THEORY OF THE POGGENDORFF ILLUSION. B. Gillam en *Perception and Psychophysics,* vol. 10, n.º 4A, págs. 211-216; 1971

THE PSYCHOLOGY OF VISUAL ILLUSION. J. O. Robinson. Hutchinson University Library, 1972.

ILLUSION IN NATURE AND ART. Dirigido por R. L. Gregory y E. H. Gombrich. Charles Scribner's Sons, 1973.

SEEING IS DECEIVING: THE PSYCHOLOGY OF VISUAL ILLUSIONS. Stanley Coren y Joan S. Girgus. Laurence Erlbaum Associates, 1978.

EL ORIGEN DEL MAIZ

THE ORIGIN OF CORN. Walton C. Galinat, en *Annual Review of Genetics,* vol. 5, págs. 447-478; 1971.

CORN: ITS ORIGIN, EVOLUTION AND IMPROVEMENT. Paul C. Mangelsdorf. Harvard University Press, 1974.

ZEA DIPLOPERENNIS (GRAMINEAE): A NEW TEOSINTE FROM MEXICO. Hugh H. Iltis, John F. Doebley, Rafael Guzmán y Batia Pazy, en *Science,* vol. 203, n.º 4376, págs. 186-188; 12 de enero de 1979.

LA RABIA

THE NATURAL HISTORY OF RABIES. Dirigido por George M. Baer. Academic Press, 1975.

SUCCESSFUL PROTECTION OF HUMANS EXPOSED TO RABIES INFECTION. Mahmoud Bahmanyar, Ahmad Fayaz, Shokrollah Nour-Salehi, Manouchehr Mohammadi e Hilary Koprowski, en *The Journal of the American Medical Association,* vol. 236, n.º 24, págs. 2751-2754; 13 de diciembre de 1976.

MONOCLONAL ANTIBODIES AGAINST RABIES VIRUS PRODUCED BY SOMATIC CELL HYBRIDIZATION: DETECTION OF ANTIGENIC VARIANTS. T. J. Wiktor y H. Koprowski, én *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,* vol. 75, n.º 8, págs. 3938-3942; agosto, 1978.

ENZIMAS ALOSTERICOS

QUANTITATIVE ASPECTS OF ALLOSTERIC MECHANISMS. A. Levitzki. Springer-Verlag. 1978.

ENZIMAS ALOSTÉRICOS. COOPERATIVIDAD EN LA UNIÓN Y EN LA CATÁLISIS. E. Cadenas. H. Blume Ediciones. Madrid, 1978.

BIOLOGÍA MOLECULAR DE LA REGULACIÓN. E. Cadenas. Ediciones Omega S. A. *(En preparación.)* Barcelona.

JUEGOS MATEMATICOS

SOME STUDIES IN MACHINE LEARNING USING THE GAME OF CHECKERS, II: RECENT PROGRESS. A. L. Samuel, en *IBM Journal of Research and Development,* vol. 11, n.º 6, págs. 601-617; noviembre, 1967.

THE COMPLEXITY OF CHECKERS ON AN $N \times N$ BOARD-PRELIMINARY REPORT. A. S. Fraenkel, M. R. Garey, D. S. Johnson y Y. Yesha, en *19th Annual Symposium on the Foundations of Computer Science.* Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

ANALYTICAL ABSORPTION SPECTROSCOPY: ABSORPTIMETRY AND COLORIMETRY. Dirigido por M. G. Mellon. John Wiley & Sons, Inc., 1950.

Taller y laboratorio

Sistemas para construir hologramas y ver el comportamiento de los fluidos

Jearl Walker

Se han empleado muchas técnicas para hacer hologramas, esas llamativas fotografías tridimensionales que dan al observador el mismo sentido de paralaje y profundidad que despertaría la visión de la escena real. John Osborne y Bob Waterman, del South London Science Center, acaban de remitirme un montaje nuevo. Dicha técnica, la más sencilla que conozco, es, además, muy poco sensible a las vibraciones, que enturbian otros métodos de construcción de hologramas.

Las fotografías convencionales graban la luz dispersada por un objeto y enfocada sobre un rollo de película. El resultado es una imagen plana sin profundidad aparente. Los hologramas se distinguen porque no registran la imagen enfocada de un objeto, sino la interferencia entre la luz dispersada por el objeto y parte de la luz directa procedente de la fuente de iluminación del mismo.

En el proceso básico de construcción de hologramas, la luz de un láser se parte en dos haces por una placa de vidrio parcialmente reflectante; un haz resulta de la transmisión de la luz a través de la placa y el otro de la reflexión de la luz en su superficie. Uno de los haces ilumina directamente una película, el otro se dispersa a partir del objeto que estamos fotografiando. Parte de la luz dispersada ilumina también la película interfiriéndo la iluminación directa. La película está, por tanto, expuesta a los componentes claros y oscuros de la interferencia, que en su mayoría son demasiado finos para que el ojo humano pueda verlos directamente.

Una vez revelada la película, puede reconstruirse la interferencia poniéndola en el haz de un láser. Cuando se ve la película iluminada así, la figura de interferencia crea una imagen del objeto fotografiado; la imagen es virtual, ya que su existencia es ilusoria, dependiendo totalmente de los ojos del observador para focalizar los rayos de luz procedentes de la película. La ilusión puede ser convincente porque el paralaje y la profundidad en la escena original se mantienen de una manera fiel. Cuando se examina la película desde una perspectiva ligeramente distinta, los ojos captan una parte algo distinta de la figura de interferencia, y, por tanto, se aprecia una perspectiva algo diferente de la imagen virtual, exactamente como si el objeto estuviera allí en realidad.

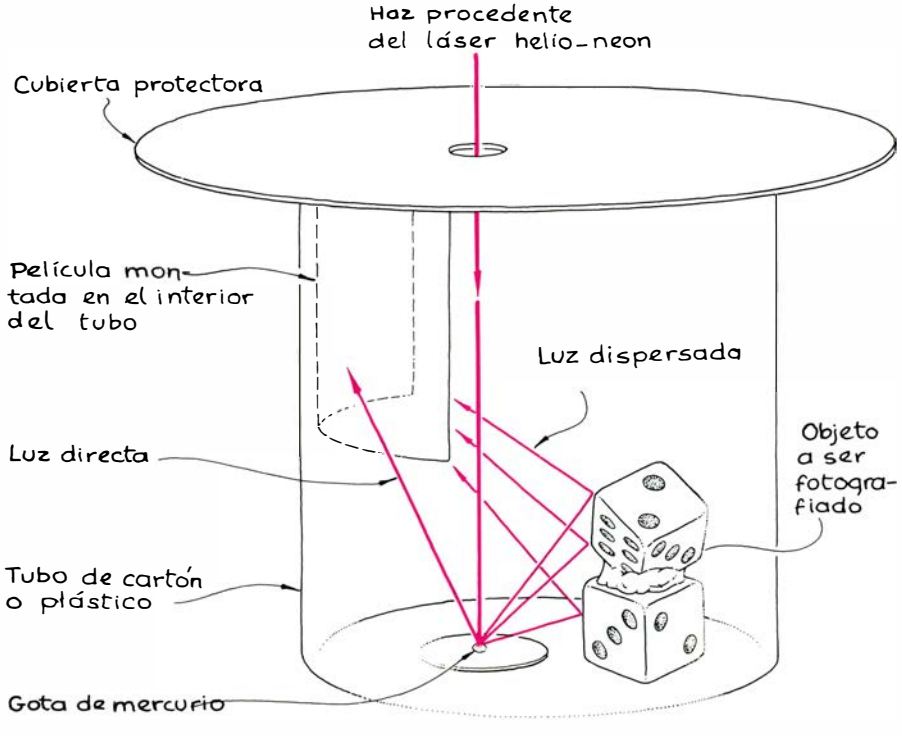
Para construir un holograma se necesitan varias lentes, una placa de vidrio parcialmente reflectante y una plataforma resistente. El conjunto del láser y los componentes ópticos debe estar lo más libre de vibraciones posible mientras se realiza la exposición, pues de no ser así la interferencia aparecerá borrosa en la película. La gente que se dedica a investigar con hologramas recurre a menudo a montajes complicados para anular las vibraciones de su equipo.

Osborne y Waterman han eliminado la necesidad de lentes y placas de vidrio por medio de una inteligente colocación del haz láser y una gota o una bolita brillante de mercurio. El láser se monta en un trípode de forma que el haz enfoque, desde arriba, hacia la bolita de mercurio, colocada en una pequeña plataforma sobre el suelo. (El hecho de que el aparato ocupe poco sitio en el suelo contribuye a la ausencia relativa de vibración.) El objeto que va a ser fotografiado se instala cerca de la bolita de mercurio, después de lo cual se coloca un cilindro de cartón o plástico sobre el conjunto total. En un lado del cilindro, un poco por encima del nivel del objeto, está la película a impresionar.

El láser ilumina la bolita de mercurio, que envía parte de la luz directamente a la película y parte al objeto que va a fotografiarse. Parte de la luz dispersada por el objeto impresiona también la película e interfiere la iluminación directa de la película. Una vez que se ha revelado la película, ésta es un holograma del objeto fotografiado.

Para ver el holograma se monta la película revelada en una apertura cortada en la cara de otro cilindro. Este cilindro se coloca en torno a la bolita de mercurio como estaba el primero. Cuando el rayo ilumina de nuevo el mercurio, parte de la luz se refleja en la película; al recibir esta luz, el observador contempla una imagen virtual del objeto en algún lugar dentro del cilindro.

Se puede recrear la ilusión con casi cualquier superficie reflectante que se ponga en sustitución de la bolita. Así, con un trozo de tiza o papel blanco, que



Montaje con el que John Osborne y Bob Waterman construyen sus hologramas

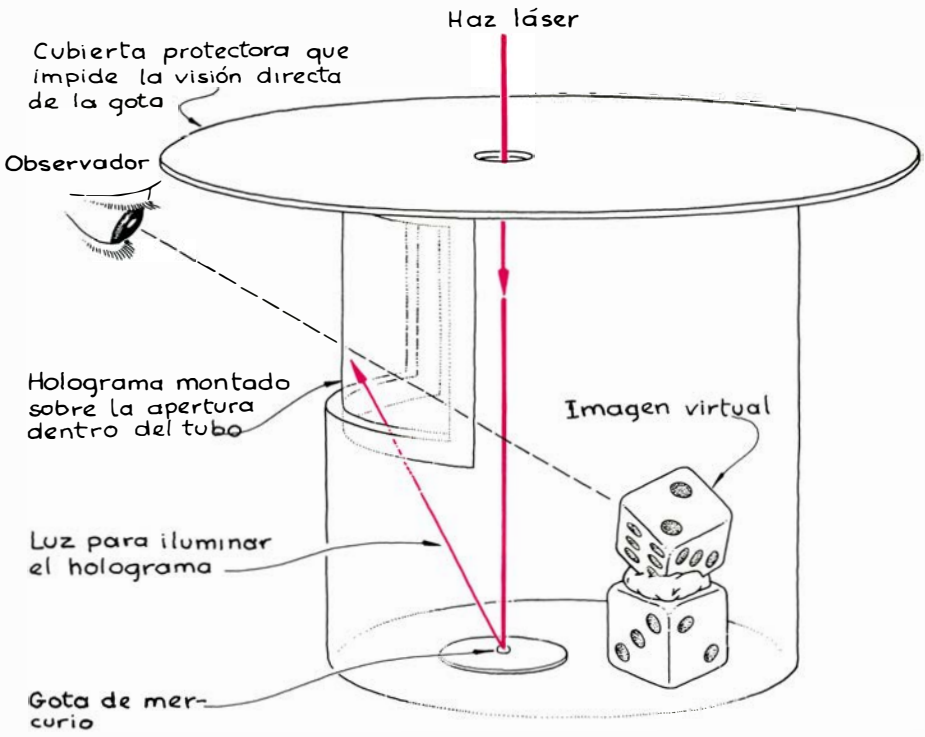
reflejarán luz suficiente para permitirle al observador ver la imagen virtual. Se puede incluso eliminar el láser, introduciendo una pequeña lámpara blanca en el punto en el que normalmente se pone la bolita. (El láser, por supuesto, es necesario de todas formas para hacer el holograma.) Con la lámpara, el holograma se coloreará, con la misma nitidez con que lo sería con la luz monocromática del láser. Los diferentes colores de la luz blanca crearán, cada uno, una imagen holográfica ligeramente corrida en el campo de visión del observador. Se puede evitar en parte que la imagen aparezca borrosa si el observador la mira a través de un filtro coloreado que elimine todos los colores menos uno.

Por fuente de luz blanca Osborne y Waterman emplean una bombilla tipo flash de 2 volt, miniatura. La lámpara, provista de un filamento pequeño, resulta adecuada como fuente puntual de luz para reemplazar la fuente original de luz láser procedente de la bolita de mercurio. El extremo de la lente de la lámpara se ennegrece de suerte que emita luz únicamente desde los lados.

No tiene por qué ser muy potente el láser de helio-neón utilizado para realizar la exposición. Sin embargo, cuanto más potente sea, más podrá acortarse el tiempo de exposición y así se reducirán los problemas planteados por las vibraciones. Osborne y Waterman utilizan un láser con una potencia no superior a los 0,7 miliwatt, que está entre los más potentes de los empleados en los laboratorios de enseñanza superior y formación profesional.

El láser se deja en funcionamiento mientras preparamos la exposición de la película; se bloquea el haz mediante un obturador de una cámara fotográfica vieja. Terminados los preparativos, se dispara el obturador por medio de un cable con el fin de evitar la vibración del aparato. Una velocidad típica de exposición es 0,3 segundos. Se puede sustituir el disparador por una tarjeta, pero la exposición resultaría entonces algo menos fiel.

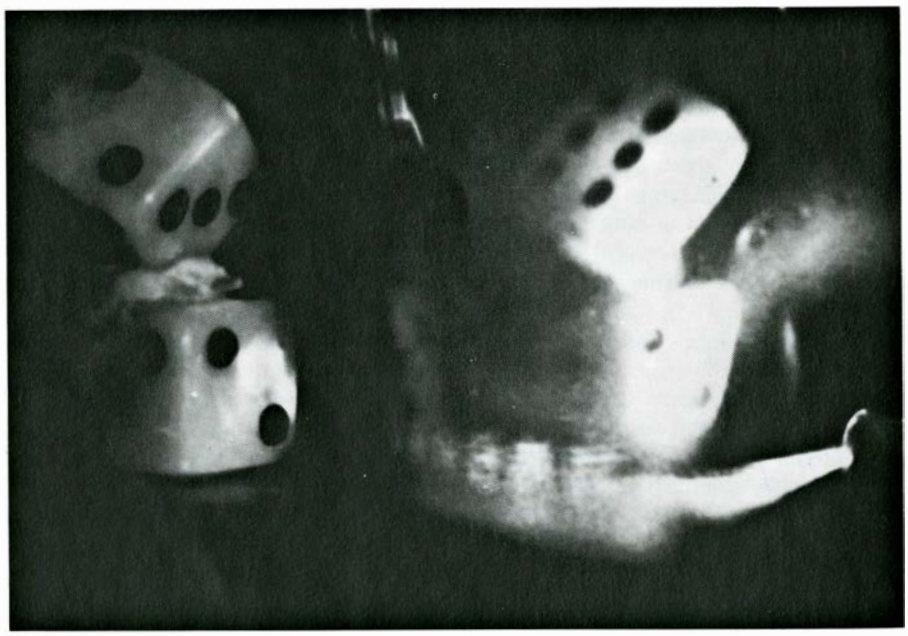
Esta técnica de hacer hologramas tiene cuatro inconvenientes. Primero: el objeto debe estar próximo a la bolita y a la película y, por tanto, sólo pueden tomarse fotografías desde muy de cerca. Segundo: dado que la luz se dispersa hacia arriba, hacia el objeto y la película, la disposición produce una imagen con el aspecto de una foto a la luz de las candilejas. Tercero: es difícil el ajuste óptimo de la intensidad de la luz directa y la dispersada. El incremento de la intensidad de una implica necesariamente la reducción de la intensidad de la otra.



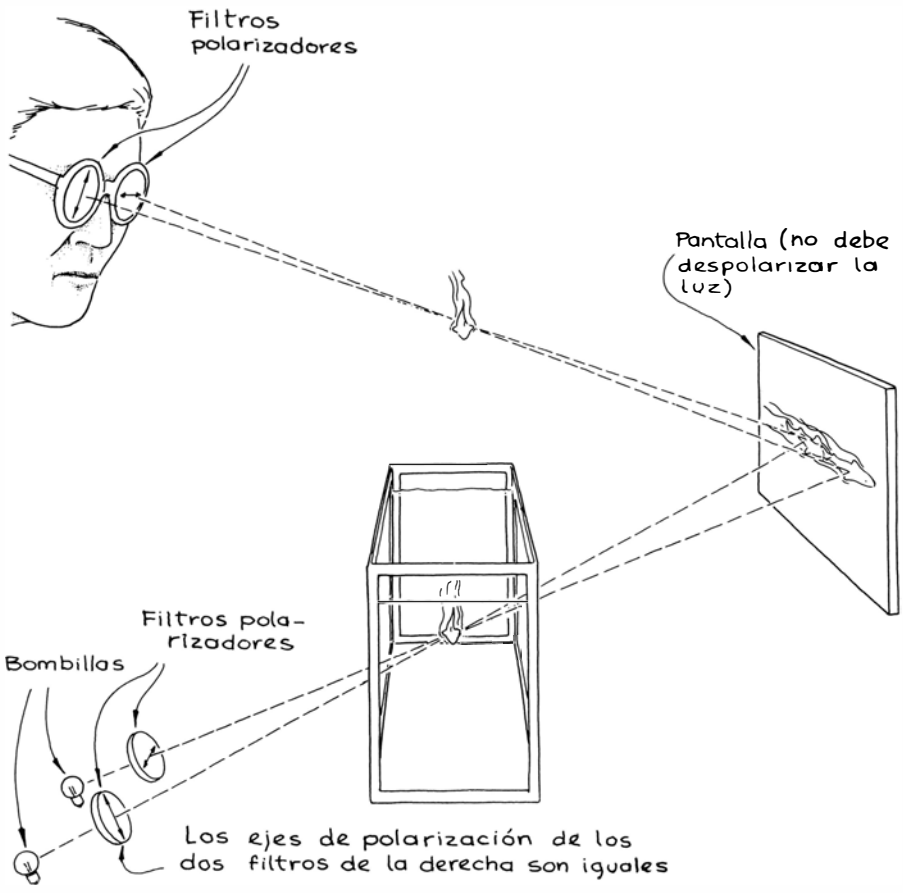
Cómo ver el holograma

Idealmente ambas deberían tener parecidas intensidades en la película, de forma que se produjera una interferencia de buena calidad. Y, por último: la mayor parte de la luz reflejada por la bolita se dirige hacia arriba y, en consecuencia, se pierde.

La bolita de mercurio debería medir unos 1,8 milímetros de diámetro. El mercurio limpio se puede sacar de un termómetro, calentándolo y recogiéndolo en una cavidad formada con un trozo de plástico. Cuando no se esté usando el mercurio, deberemos protegerlo del polvo para que conserve su brillo. No obstante lo dicho anteriormente, el tamaño óptimo de la gota sólo podrá determinarse en el curso de varios experimentos. El proceso a seguir estriba en conseguir las intensidades de luz en el nivel de la película que produzcan la interferencia adecuada. Podemos recurrir a una bolita de mercurio mayor para iluminar un holograma revelado, pues entonces no será necesario dividir la luz para iluminar el objeto.



Par de dados y su imagen holográfica



Montaje de McCutchen para proyectar una sombra

El sitio ideal de experimentación será el suelo de cemento de un sótano, pues los pisos superiores se hallan más expuestos a las vibraciones. Algunas personas que se adentran en este tipo de ensayos colocan su equipo en una caja de arena, montado en tubos interiores. La gran masa de arena frena las vibraciones y los tubos interiores ayudan a aislar el experimento de las vibraciones de la habitación.

Además de amortiguar las vibraciones, se debe tratar de evitar que las corrientes de convección y el propio aliento pasen a través del cilindro durante la preparación; unas y otro pueden crear variaciones en el índice de refracción del aire del interior del cilindro. Estas variaciones originarían, a su vez, otras variaciones en la figura de interferencia de la película y, por tanto, el holograma se vería borroso.

Osborne y Waterman prefieren hacer sus experimentos con película Agfa-Gevaert 10E75AH (35 por 31 milímetros), pero se puede sustituir por otros tipos, incluyendo el 8E75AH y el 20E75AH. La película se revela con el revelador Agfa G3p durante cinco minutos a una temperatura de 20 grados Celsius. El fijador, el normal para las fotografías en blanco y negro, necesita otros cinco.

Una vez instalado el aparato y nos hallemos ya dispuestos a construir un holograma, el primer paso será comprobar que se tiene la iluminación adecuada al nivel de la película. Esta puede comprobarse con un trozo de papel traslúcido montado en sustitución de la película y examinando la iluminación reflejada por la bolita de mercurio y por el objeto que va a ser fotografiado. Si la iluminación no es uniforme, se puede intentar conseguirla con una bolita de tamaño diferente (quizás otra más pequeña) o girándola en el haz láser.

Cuando la iluminación parezca ser óptima, se quita el papel fraslúcido, se bloquea el láser con un obturador o una tarjeta, se apaga la luz de la habitación, se saca la película del cartucho y se monta en el soporte de la misma en el cilindro que rodea el aparato. Después de la exposición se revela la película, se seca y se examina luego en el dispositivo para completar el holograma. Se conseguirá una buena exposición sólo después de experimentar con la iluminación y la obturación del láser. Conviene intentar conseguir un ligero oscurecimiento de la película.

El holograma debería registrar la mayor parte posible del objeto. Osborne y Waterman han fotografiado una cabrita de juguete. Cuando se ve el holograma, la imagen de la cabra se puede invertir, girando el cilindro que sostiene el holograma o moviendo la cabeza alrededor del cilindro. Se puede ver primero a la cabra de cara, después de perfil y, por último, de espaldas.

El haz láser puede ser peligroso, en especial si incide directamente sobre el ojo. Osborne y Waterman han tomado sendas precauciones para evitar que el observador vea la bolita de mercurio iluminada por la luz láser. Sobre el extremo superior del cilindro colocan una lámina de cartulina con un agujerito perforado en su centro que permita el paso del haz láser. En consecuencia, aunque dirijamos la mirada hacia el interior del cilindro, no veremos la bolita brillante. Como segunda precaución procuran que esa cartulina sea lo suficientemente extensa para que el observador no reciba luz directa de la bolita cuando esté mirando la imagen producida por el holograma.

Las técnicas experimentales para poner de manifiesto el flujo de un fluido han constituido desde siempre un desafío. Generalmente se emplean finos chorros de colorantes o pequeños trazadores de ciertos tipos. Dichas técnicas suelen ser toscas y de difícil interpretación, en especial cuando el flujo es turbulento. Si el objeto que se desea estudiar es un pez nadando, las mencionadas técnicas resultan poco menos que inviables. ¿Cómo hacer que el pez se esté quieto antes de introducir el trazador y que luego, a una indicación del experimentador, se mueva durante un breve intervalo de tiempo? Si se emplean múltiples marcadores, la estela dejada por el pez puede ser tan complicada que el observador necesitaría la ayuda de un computador para descifrarla.

C. W. McCutchen, del National Institute of Arthritis, Metabolism, and Digestive Diseases, ha ideado un nuevo sistema para subsanar estos problemas. Su sistema proporciona tan sólo la información precisa para que el observador interprete fácilmente los movimientos del fluido. No necesita el auxilio de los confusos colorantes o de pequeños marcadores, y lo mejor de todo, un espécimen vivo no ha de esperar la señal del experimentador para ponerse a nadar.

El sistema en cuestión se basa en el empleo de luz polarizada procedente de fuentes puntuales para crear una sombra del espécimen y de la estela que deja a su paso. Debe iluminarse el acuario con dos lámparas. Frente a cada una de ellas está montado un filtro polarizador de forma que los haces de ambas lámpa-

ras queden polarizados perpendicularmente, uno respecto al otro. La estrategia consiste en proyectar dos sombras del espécimen sobre una pantalla colocada detrás del acuario. El observador examina las sombras a través de unas gafas polarizadoras especiales cuyos ejes de polarización de ambas lentes son perpendiculares entre sí. Con las luces y las gafas adecuadamente orientadas, el ojo izquierdo sólo ve la sombra proyectada por la lámpara de la izquierda y el ojo derecho sólo la proyectada por la lámpara de la derecha. El cerebro combina estas dos imágenes para formar una figura estereoscópica de las sombras. Aunque tales sombras sean planas sobre la pantalla, la sombra estereoscópica compuesta muestra el paralaje ordinario y da así la impresión de profundidad.

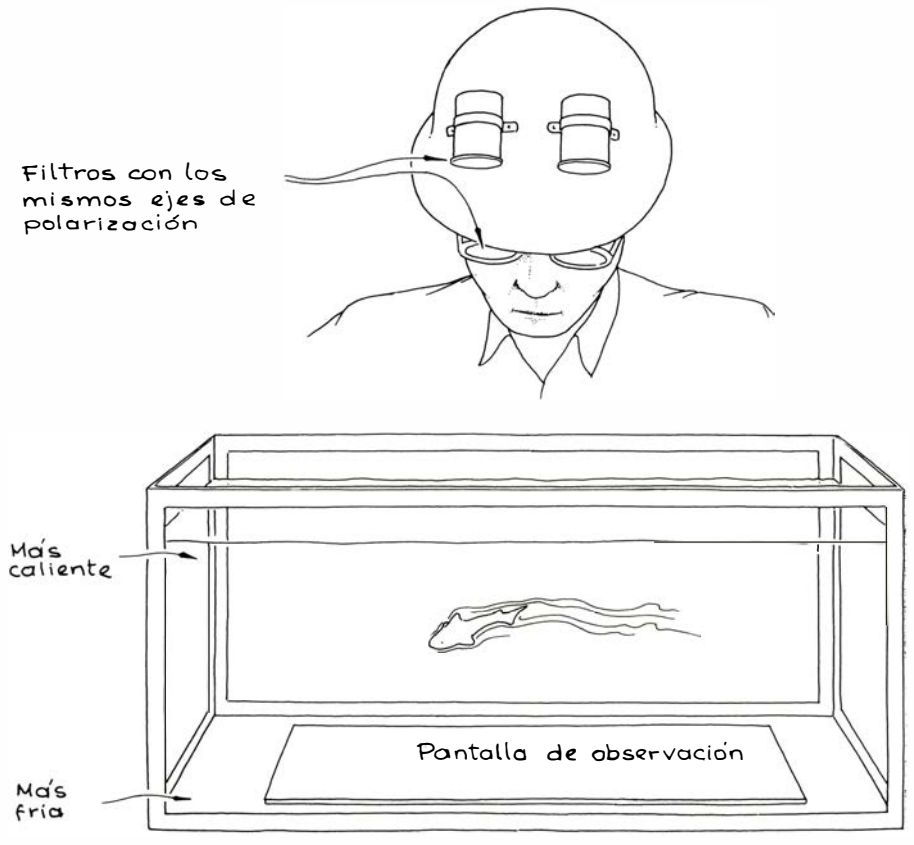
La estela dejada por un pez no proyecta una sombra ordinaria debido a que el agua es transparente. Para crear una sombra del flujo de fluido, McCutchen empieza introduciendo un gradiente vertical de temperatura en el agua. Cuando un pez se mueve a través del agua térmicamente estratificada, la estela deja regiones con bruscos contrastes térmicos. La luz que atraviesa estas zonas se refracta y, como resultado de ello, la estela produce sobre la pantalla una sombra que consiste en una serie de líneas brillantes y obscuras. Cada lámpara produce una sombra de la estela. El sistema visual funde las dos imágenes y suministra la información suficiente para que el observador contemple una imagen de la estela totalmente tridimensional. Este método no exige que el pez se detenga a la espera de una señal del observador.

El experimento sólo requiere un suave gradiente de temperatura (uno o dos grados Celsius por centímetro). No es necesario que tal gradiente sea lineal, aunque debe extenderse hasta el fondo del agua del acuario. El sistema de McCutchen para obtener un flujo continuo de agua a través del acuario implica la adición de agua caliente por la parte superior y de agua fría por la inferior. El agua sale por la zona media lateral. Se fijan esponjas en las entradas para evitar que el agua entrante se mezcle con el agua del acuario y se destruya el gradiente de temperatura. Tampoco es imprescindible este constante fluir del agua, pero sin el flujo el experimentador dispone tan sólo de unos minutos antes de que el proceso de difusión destruya el gradiente de temperatura. Sin embargo, éste puede ser tiempo suficiente para un sencillo experimento o para observar un pez.

Para facilitar la observación, podemos montar los filtros polarizadores y las lámparas sobre un casco. Así se conserva el montaje óptico adecuado, aun cuando el observador se mueva para cambiar de perspectiva. Se emplean lámparas de microscopio de 6 volt, montadas a unos diez centímetros de distancia una de otra. Separaciones todavía mayores potencian la ilusión de profundidad. Aunque el observador está viendo también el objeto real, éste es ignorado rápidamente en aras de las sombras. (Debido a que estamos trabajando con agua, alimente las lámparas con una batería que no esté en absoluto conectada a la red eléctrica.)

La pantalla no debe despolarizar la luz; de lo contrario, ambos ojos verían las dos sombras. McCutchen emplea el lado mate de una hoja de aluminio, montada con la parte más larga paralela a una línea que uniera los ojos del observador. Tal sistema proporciona usualmente imágenes de las sombras de intensidades parecidas, facilitando de esta forma la ilusión estereoscópica. Tambien podrían servir otros metales con un acabado mate, superficies cubier-

"Sombrografía" de un pez nadando a propulsión



Lámparas y filtros polarizadores montados en un casco

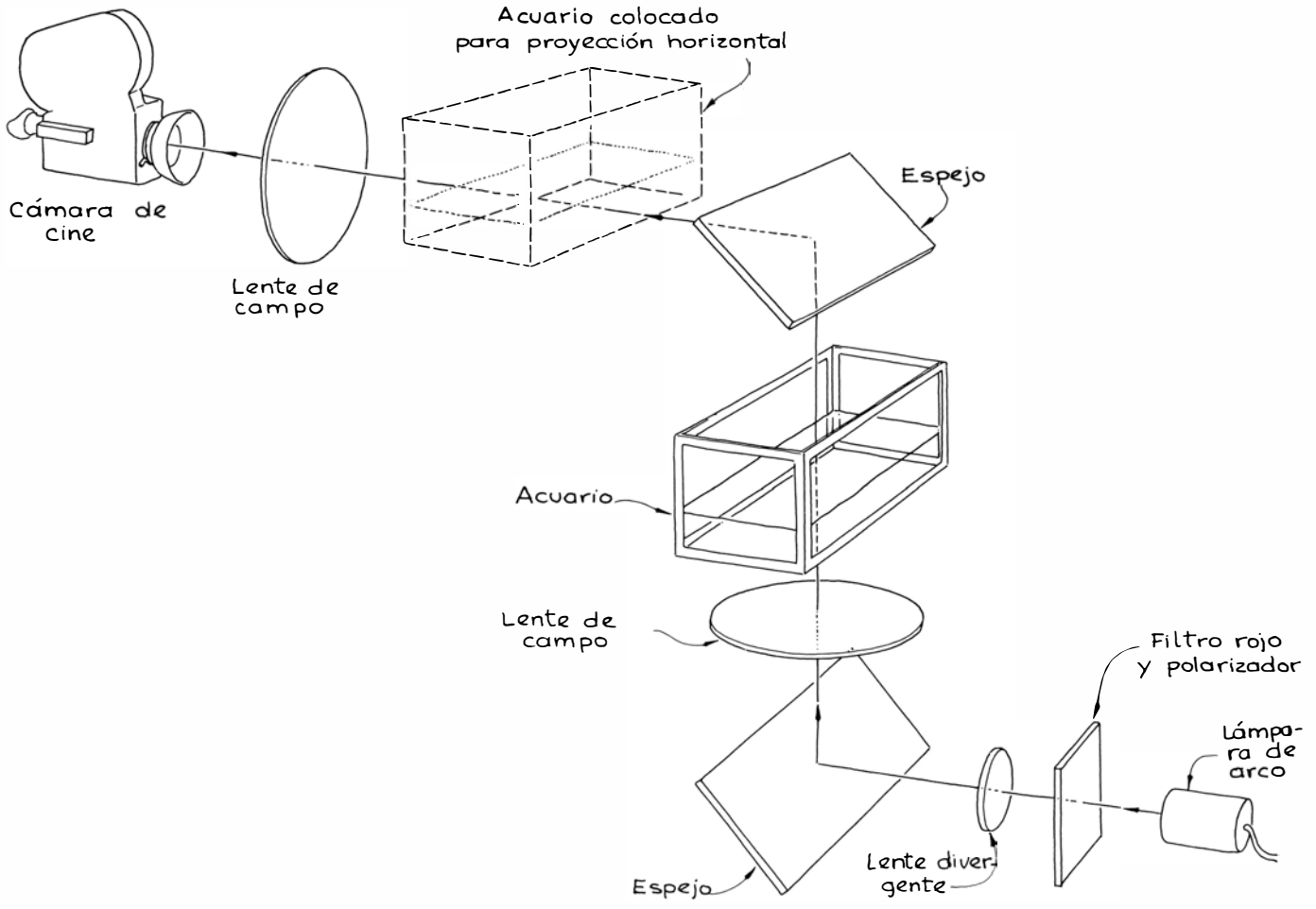
tas con pintura de aluminio y pantallas de cristal esmerilado. McCutchen ha montado su lámina de aluminio sobre un marco de madera a modo de bastidor. Cuando el conjunto se sumerge en el agua la madera se hincha, dejando el aluminio tirante. La pantalla puede ser vertical (para facilitar la visión horizontal del espécimen) o estar colocada en el fondo (para lograr una visión desde lo alto). Las olas de la superficie pueden distorsionar los resultados en este último montaje. Para evitar ese inconveniente, McCutchen hace flotar una lámina de plástico transparente sobre la superficie del agua por medio de piezas de styrofoam.

El tiempo durante el que persistirá la estela depende de dos factores: las fuerzas convectivas que actúan sobre el agua de las distintas zonas de la estela y el ritmo de conducción de calor entre estas zonas. Las fuerzas de convección se deben a la dependencia de la densidad del agua con la temperatura. El agua fría es más densa que la caliente y se hunde en ella. Con un gradiente de temperatura de alrededor de un grado Celsius por centímetro, una estela permanecerá durante unos 15 segundos. Pasado este tiempo, los bruscos contrastes térmicos en la estela se han suavizado debido al hundimiento y a la elevación de distintas regiones del agua y al intercambio de calor entre las zonas que están a diferente temperatura.

Muchos de los problemas de aerodinámica clásica pueden investigarse con el sistema de McCutchen. Por ejemplo, una pequeña ala dibuja a través de los estratos del agua un vórtice visible similar al ideal descrito en la mayoría de textos. Los anillos del vórtice, al igual que los anillos de humo, pueden crearse con la ayuda de un recipiente cilíndrico de plástico que tenga un pequeño agujero circular perforado en su fondo. Llenando el recipiente con agua caliente, o fría, y presionándolo con rapidez, se formará un bonito anillo de vorticidad. Con varios chorros, o con muchos agujeros, será posible obtener anillos de vorticidad que interaccionen mutuamente.

McCutchen empleó su montaje para el estudio del movimiento de un pequeño pez, un danio cebra (*Brachydanio rerio*), que mide unos tres centímetros de longitud. El estudio ha revelado una compleja variedad de mecanismos de propulsión, ninguno de los cuales parece ser muy eficiente. Tanto la propulsión principal como el mecanismo para cambiar de dirección proceden de un coletazo vigoroso, y breve, que va seguido de un período de deslizamiento. Durante el impulso, la extensión de las aletas dorsal y anal cambia sutilmente. Al inicio del coletazo ambas aletas están extendidas, pero durante el golpe de retorno las aletas en cuestión están menos extendidas. Cuando el pez comienza a deslizarse después de un coletazo, todas las aletas están plegadas; se van abriendo a medida que el pez frena su marcha. Por lo general, la detención brusca se ejecuta mediante las aletas pectorales, pero a veces el pez echa una pequeña cantidad de agua por la boca para aumentar el efecto de frenado. Cuando el pez permanece inmóvil, mantiene su posición creando una débil corriente descendente de agua con las aletas pectorales y con la cola.

Estos movimientos y otros más se manifiestan en las imágenes de las sombras, pero son demasiado rápidos para



Montaje óptico necesario para fotografiar la estela de un pez

seguirlos a simple vista. A fin de retardar el movimiento y obtener también una grabación permanente, McCutchen sacrifica la profundidad en las imágenes de las sombras y fotografía la sombra proyectada por una única luz. El montaje aparece en la ilustración de la página 122. Una lente de gran diámetro (lente de campo) envía un haz de luz paralelo a través del acuario. Otra lente similar focaliza la luz hacia una cámara tomavistas. La cámara está enfocada aproximadamente a la mitad de la distancia a la lente, no sobre el acuario. McCutchen afirma que este enfoque aumenta la sensibilidad de la cámara a las pequeñas discrepancias en la refracción de la luz que atraviesa la estela. Se inserta un filtro rojo en la trayectoria de la luz a fin de eliminar el problema de la aberración cromática de los objetivos de campo.

La cámara opera a unas 44 imágenes por segundo. McCutchen consiguió reducir la velocidad, paralizarla e invertirla, a pesar de lo cual el pez que estudiaba todavía se movía demasiado deprisa para que se pudieran captar los detalles de su desplazamiento. Es sorprendente lo poco que se sabe acerca de los mecanismos de propulsión de los peces, de manera que si al lector le interesan los experimentos de McCutchen podrán contribuir a un mejor conocimiento de dichos mecanismos.

Me han escrito algunos lectores hablándome de mi artículo sobre los líquidos no-newtonianos publicado en esta misma sección en enero de 1979. Un líquido no-newtoniano es una sustancia bastante rara que se caracteriza porque su viscosidad cambia cuando se agita y remueve el fluido. Los líquidos newtonianos, como el agua, se comportan de otra manera.

Entre la correspondencia recibida estaba la carta que me escribió I. Slabicky, de Newport, R.I. Me expone en ella cómo producir el efecto Kaye fácilmente. El efecto es un curioso salto de una parte del fluido viscoelástico al verterlo en un recipiente del mismo fluido. Slabicky vertió un chorrito (de dos a cuatro milímetros de diámetro) de champú Agree en la palma de su mano desde una altura de unos 15 centímetros. Ajustando la altura y el grosor del chorro, descubrió cierta combinación que producía el efecto Kaye casi sin solución de continuidad, dando saltitos de hasta 25 milímetros.

Mary R. Hebrank, de la Universidad de Duke, me habló de los muchos e importantes fluidos biológicos que muestran características de líquidos no-newtonianos. Dentro de determinado intervalo de agitación, la sangre es no-newtoniana, hecho que puede ser importante para algunos aspectos de la circulación sanguínea en los seres humanos y otros animales. Se está investigando ya sobre los aspectos no-newtonianos del líquido sinovial, que lubrifica las articulaciones de los organismos vertebrados, y del mucus.

El mucus puede desempeñar un papel importante en la reducción del arrastre en algunos tipos de peces. Según algunas teorías, esta reducción del arrastre puede depender del comportamiento no-newtoniano del mucus (o limo) de la superficie del pez. Por ejemplo, cuando un pez tiene que nadar rápidamente, parte de su mucus corporal puede mezclarse con el agua que lo roza. A mayor velocidad de desplazamiento, la capa de agua próxima a la superficie del pez tiende a formar turbulencia, incrementando el arrastre. La adición de una pequeña cantidad de mucus al agua en turbulencia puede incrementar la viscosidad y, en consecuencia, reducir la turbulencia, de manera que el pez puede nadar más rápidamente.

Muchas de las demostraciones que he descrito pueden verse en una película, *Comportamiento reológico de los fluidos,* realizada por Hershel Markovitz, de la Carnegie-Mellon University. Dicha película es distribuida por la Encyclopaedia Britannica Educational Corporation e incluye varios experimentos interesantes hechos con líquidos coloreados en un fluido no-newtoniano que rodeaba a una esfera giratoria. Demuestra también muy claramente el efecto Weissenberg, en virtud del cual un líquido rotante sube por una varilla central en vez de hacerlo por la pared exterior del recipiente.

Barbara H. Shafer, de Greene, R.I., me escribió a propósito del extraño comportamiento de su pulpa de nuez. Ella acostumbra a prepararla la víspera de un día de fiesta y la congela. A medida que la va cocinando, ésta no muestra señales de tener mucha agua, pero cuando se descongela aparece una abundante cantidad de líquido por encima. Calienta entonces el recipiente al baño maría, pero ni siquiera entonces se reabsorbe. Así pues, justo antes de servir la pulpa la bate y cuanto más fuerte lo hace, más espesa se pone. El batido parece incrementar la viscosidad. Shafter duda que todas las pulpas se comporten de esta suerte, de manera que si el lector quiere repetir su experimento, podría hacerlo con otros tipos de pulpa.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

ATRIBUCION DEL ESPECTRO RADIOELECTRICO

THE INVISIBLE RESOURCE: USE AND REGULATION OF THE RADIO SPECTRUM. Harvey J. Levin. The Johns Hopkins Press, 1971.

SPECIAL ISSUE ON SPECTRUM MANAGEMENT. *IEEE Transactions on electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-19, n.º 3; agosto, 1977.

ELEMENTOS GENETICOS TRANSPONIBLES

TRANSPOSABLE GENETIC ELEMENTS AND PLASMID EVOLUTION. Stanley N. Cohen en *Nature*, vol. 263, n.º 5580, págs. 731-738; 28 de octubre de 1976.

DNA INSERTION ELEMENTS, PLASMIDS AND EPISOMES. Dirigido por A. I. Bukhari, J. A. Shapiro y S. L. Adhya. Cold Spring Harbor Laboratory, 1977.

MOLECULAR MODEL FOR THE TRANSPOSITION AND REPLICATION OF BACTERIOPHAGE MU AND OTHER TRANSPOSABLE ELEMENTS. James A. Shapiro en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 76, n.º 4, págs. 1933-1937; abril, 1979.

LA ESCRITURA ZAPOTECA

SCULPTURE AND MURAL PAINTING OF OAXACA. Alfonso Caso en *Handbook of Middle American Indians*, dirigido por Robert Wauchope y Gordon R. Willey. University of Texas Press, 1965.

MONTE ALBÁN: SETTLEMENT PATTERNS AT THE ANCIENT ZAPOTEC CAPITAL. Dirigido por Richard E. Blanton. Academic Press, 1978.

THE CLOUD PEOPLE: EVOLUTION OF THE ZAPOTEC AND MIXTEC CIVILIZATIONS OF OAXACA, MEXICO. Dirigido por Kent V. Flannery y Joyce Marcus. University of New Mexico Press (en prensa).

OBSERVATORIO EINSTEIN DE RAYOS X

X-RAY-EMITTING DOUBLE STARS. Herbert Gursky y Edward P. J. van den Heuvel en *Scientific American*, vol. 232, n.º 3, págs. 24-35; marzo, 1975.

THE *EINSTEIN* (*HEAO 2*) X-RAY OBSERVATORY. R. Giacconi, G. Branduardi, U. Briel, A. Epstein, D. Fabricant, E. Feigelson, W. Forman, P. Gorenstein, J. Grindlay, H. Gursky, F. R. Harnden, Jr., J. P. Henry, C. Jones, E. Kellogg, D. Koch, S. Murray, E. Schreier, F. Seward, H. Tananbaum, K. Topka, L. Van Speybroeck, S. S. Holt, R. H. Becker, E. A. Boldt, P. J. Serlemitsos, G. Clark, C. Cañizares, T. Markert, R. Novick, D. Helfand y K. Long en *The Astrophysical Journal*, vol. 230, n.º 2, Parte 1, págs. 540-550; 1 de junio de 1979.

EL PARQUE DE YELLOWSTONE, VENTANA AL INTERIOR DE LA TIERRA

YELLOWSTONE HOT SPOT: NEW MAGNETIC AND SEISMIC EVIDENCE. R. B. Smith, R. T. Shuey, R. C. Friedline, R. M. Otis y L. B. Alley en *Geology*, vol. 2, n.º 9, págs. 451-455; septiembre, 1974.

MAGMA BENEATH YELLOWSTONE NATIONAL PARK. Gordon P. Eaton, Robert L. Christiansen, H. M. Iyer, Andrew M. Pitt, Don R. Mabey, H. Richard Blank, Jr., Isidore Zietz y Mark E. Gettings en *Science*, vol. 188, n.º 4190, págs. 787-796; 23 de mayo de 1975.

YELLOWSTONE HOT SPOT: CONTEMPORARY TECTONICS AND CRUSTAL PROPERTIES FROM EARTHQUAKE AND AEROMAGNETIC DATA. R. B. Smith, R. T. Shuey, J. R. Pelton y J. P. Bailey en *Journal of Geophysical Research*, vol. 82, n.º 26, págs. 3665-3676; 10 de septiembre de 1977.

PLANETAS CON ANILLOS

THE PLANET SATURN. F. A. Alexander. Faber and Faber, London; 1962.

THE RINGS OF SATURN. Frank Palluconi y Gordon H. Pettengill. NASA SP-343; 1974.

THE RINGS OF SATURN. James B. Pollack en *Space Science Review*, 18, págs. 3-39; 1975.

THE OUTER PLANETS. D. M. Hunten en *Scientific American*, 233, p. 130; 1975.

AZIMUTHAL BRIGHTNESS VARIATION OF SATURN'S RING A, AND SIZE OF PARTICLES. Ignacio Ferrín en *Nature*, 271, págs. 528-529; 1978.

PHYSICAL STUDIES OF THE PLANETARY RINGS. W. H. Ip. Max-Planck Institute fur Aeronomie, Publication MPAE-W-100-79-02; 1979.

LA PERCEPCION DEL CRECIMIENTO HUMANO

THE FACE OF CHANGE ON CHANGING FACES: IMPLICATIONS FOR A THEORY OF OBJECT PERCEPTION. Robert E. Shaw y John B. Pittenger en *Perceiving, Acting and Knowing*, dirigido por Robert Shaw y J. Bransford. Halsted Press, 1977.

PERCEPTUAL INFORMATION FOR THE AGE-LEVEL OF FACES AS A HIGHER ORDER INVARIANT OF GROWTH. John B. Pittenger, Robert E. Shaw y Leonard S. Mark en *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 5, n.º 3, págs. 478-493; agosto, 1979.

CANGREJOS DECORADORES

ATTACHMENT OF DECORATING MATERIALS IN *LOXORHYNCHUS CRISPATUS*. Mary Katherine Wicksten en *Transactions of the American Microscopical Society*, vol. 97, n.º 2, págs. 217-220; 1978.

DECORATING BEHAVIOR OF *LOXORHYNCHUS CRISPATUS* AND *LOXORHYNCHUS GRANDIS*. Mary Katherine Wicksten en *Crustaceana*, suplemento 5, págs. 37-46; 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

THE FOUR-COLOR PROBLEM. Oystein Ore. Academic Press, 1967.

LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DEL MAPA DE CUATRO COLORES. Kenneth Appel, Wolfgang Haken en *Investigación y Ciencia* n.º 15, págs. 78-91; diciembre, 1977.

TALLER Y LABORATORIO

FLOW VISUALIZATION WITH STEREO SHADOWGRAPHS OF STRATIFIED FLUID. C. W. McCutchen en *The Journal of Experimental Biology*, vol. 65, n.º 1, págs. 11-20; agosto, 1976.

FLUID DYNAMIC PHENOMENA CAN BE DEMONSTRATED WITH STEREO SHADOWGRAPS OF STRATIFIED FLUID. C. W. McCutchen en *American Journal of Physics*, vol. 44, n.º 10, págs. 981-983; octubre, 1976.

FROUDE PROPULSIVE EFFICIENCY OF A SMALL FISH, MEASURED BY WAKE VISUALISATION. C. W. McCutchen en *Scale Effects in Animal Locomotion*, dirigido por T. J. Pedley. Academic Press, 1977.

Taller y laboratorio

En busca de trilobites y crinoideos fosilizados

Jearl Walker

He pasado unos meses en Ohio coleccionando fósiles. Las zonas de excavación eran unas veces arcillosas y calizas otras. Ohio tiene una amplia variedad de fósiles en excelente estado de conservación. En el presente artículo voy a referirme a fósiles marinos, en especial a los trilobites y crinoideos, aunque también me ocuparé de algunas plantas fósiles encontradas en la zona centro-oeste de dicho estado. Haré especial hincapié en las bases fundamentales para coleccionar fósiles, a saber: cómo dar con un buen yacimiento, cómo recuperar las muestras y cómo limpiarlas.

Son muchos los aficionados especialmente interesados por los trilobites y crinoideos. Los trilobites eran artrópodos que se distinguían por la división de su cuerpo en tres lóbulos: dos laterales y un tercero central. El cuerpo se dividía además en céfalon (cabeza), tórax (parte central del cuerpo) y pigidio (cola). Los trilobites fueron probablemente animales carroñeros que se arrastraron sobre el fondo del océano, alimentándose de desechos biológicos. Tenían patas, pero tanto éstas como los demás apéndices se han conservado muy raramente en los fósiles. El exoesqueleto, más duro, se halla bien conservado en las arcillas de Ohio.

Los crinoideos eran un antiguo grupo de equinodermos. Algunos flotaban libres, pero en su mayoría se adherían al fondo por medio de un pedúnculo y algunas protuberancias a modo de raíces. Estos crinoideos se parecían más a las plantas que a los animales; semejaban lirios creciendo en plataformas como si de un jardín se tratase. El cuerpo tenía forma de taza (disco caliciforme) y la boca, en la región superior, la rodeaban cinco brazos fuertes y flexibles. Aunque el disco, brazos y pedúnculo se han conservado fósiles, es difícil hallar y extraer de las rocas un crinoideo entero sin que sufra daños irreparables. Normalmente, los coleccionistas descubren sólo partes de los crinoideos; pero estas partes pueden revelar mucho acerca de la naturaleza de esos remotos animales.

La manera más fácil de "descubrir" un yacimiento fósil es haciéndose acompañar de un experto, pero si no se nos presenta tal oportunidad, podemos nosotros mismos acometer esa labor detectivesca. La mayoría de los yacimientos están en propiedades privadas; hay que solicitar, pues, un permiso de entrada. La legislación suele ser dura con los que infringen la normativa al respecto.

Los cortes hechos en las colinas para abrir carreteras o tender líneas de ferrocarril se cuentan entre los lugares con mayores probabilidades de encerrar fósiles. Deben explorarse esos cortes, buscar fósiles que hayan sido expuestos al exterior; si no hay suerte, se excavará en cualquier saliente que tenga aspecto de roca sedimentaria. En el caso de dar con alguna muestra, habrá que proseguir en nuestra labor arqueológica. Las laderas de las carreteras recién construidas son muy prometedoras, aunque también sea preciso, quizás, el permiso correspondiente. Cuando se construyó la autopista de Cleveland hace unos años, los empleados que removían la tierra se encontraron con un magnífico depósito de peces fosilizados a escasos minutos de mi despacho de trabajo. El museo de Historia Natural de Cleveland desenterró cuidadosamente los fósiles y ahora alberga una extraordinaria colección de fósiles de peces. El depósito era pequeño, y aunque otros compañeros y yo hemos seguido buscando por los esquistos cercanos (el lugar exacto del yacimiento está cubierto ahora por la autopista), no hemos encontrado ningún otro pez fósil.

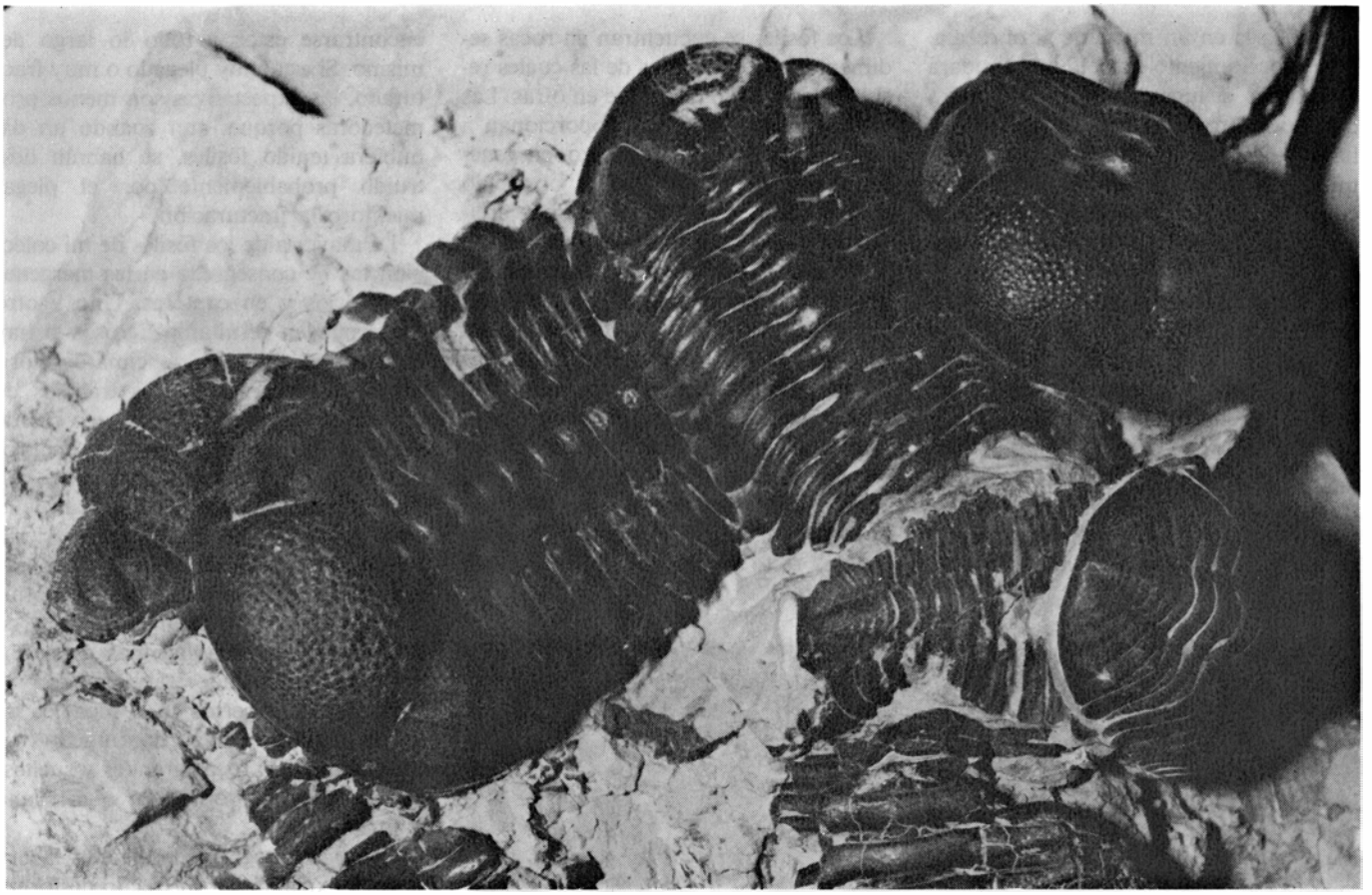
Otro lugar adecuado para investigar es a lo largo de los lechos de los ríos que cortan tierras y rocas. Andando por la orilla del cauce, hemos de fijarnos en los posibles fósiles incrustados en las rocas. Cabe el que se haya desprendido un fragmento de roca; si se advierte en la superficie expuesta una planta o animal fósil, conviene investigar las orillas del río en busca del origen de la arcilla o caliza de donde procede la roca.

Mi amigo Edgar Roeser me llevó a un río cerca de Cincinnati donde podían encontrarse restos de trilobites en las paredes del cauce y donde eran visibles algunos otros fósiles en la dura caliza del curso. De todas formas, la mayor parte de la roca que el estiaje dejaba visible resultó ser casi estéril, mostrando sólo especies comunes o muy pobres. Nosotros buscábamos un tipo particular de trilobite conocido como "flexicalimeno". Después de haber descubierto algunos fósiles en un horizonte determinado, Roeser me mostró cómo ese horizonte se remontaba río arriba y desaparecía en el agua. Después de extrapolar mentalmente el nivel del horizonte, revolvimos en el río en un lugar adecuado y empezamos a sacar fragmentos de arcilla del fondo. Al cabo de unas horas, quien más quien menos había recuperado unos cinco "flexis", algunos en muy buen estado (para llegar a ese yacimiento Roeser me hizo andar varios kilómetros por entre hiedra venenosa y robles. Las erupciones que me produjeron y que me duraron dos semanas por poco me enloquecen, pero los "flexis" merecían la pena).

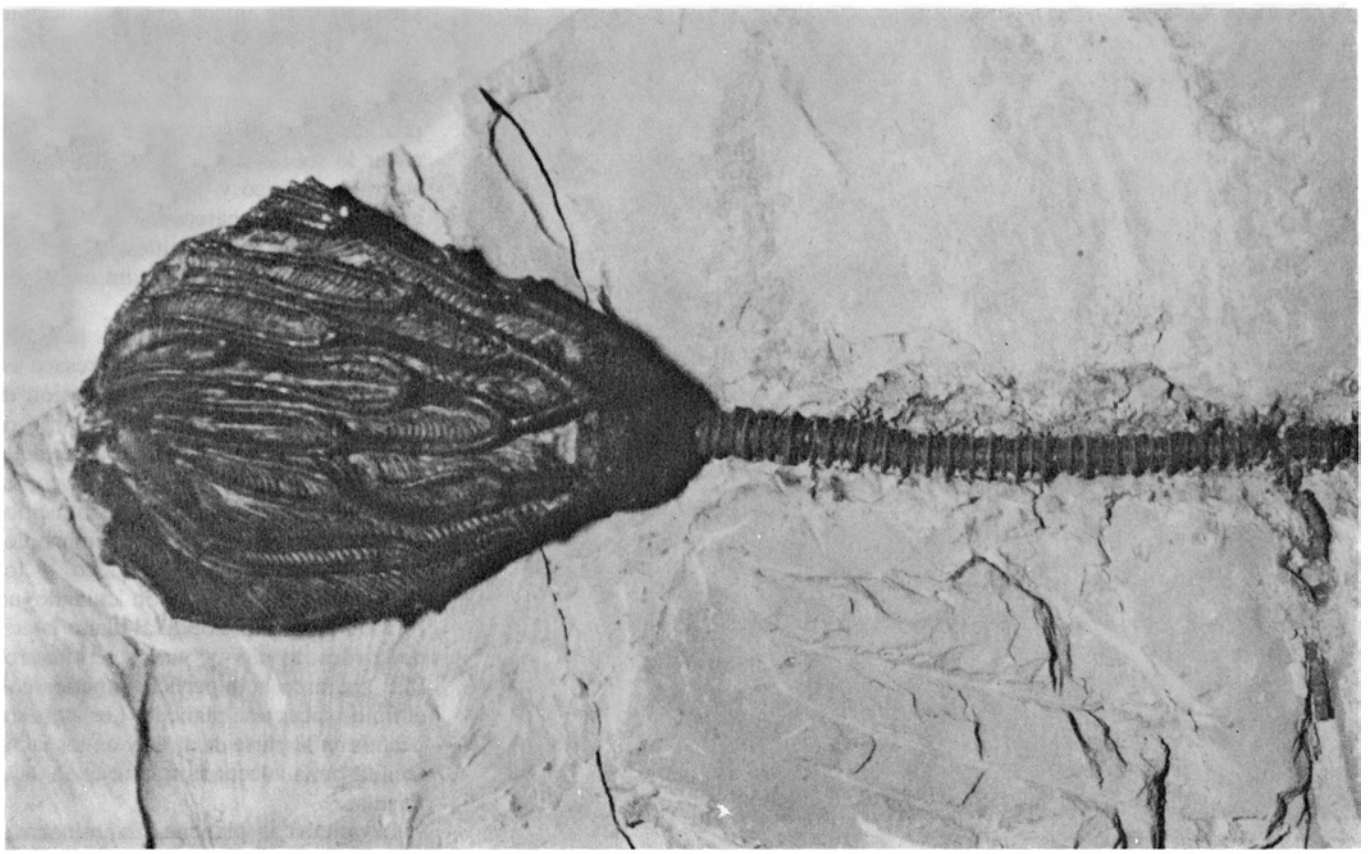
Otros lugares apropiados para hallar fósiles son las minas y las canteras abandonadas. (¡No debe entrarse nunca en el túnel de una mina abandonada!). La roca suele hallarse astillada en esos sitios por los barrenos y disgregada por la exposición a la intemperie. Mucha gente prefiere este tipo de situación porque apenas hay que cavar. En una cantera próxima a Toledo (Estados Unidos) me encontré con un coleccionista especialmente adepto a esta clase de búsqueda. Era muy hábil encontrando "rodillos" (trilobites arrollados) que yacían, segmentados y apiñados, en la cantera. Supongo que le produjo un inmenso placer enseñarnos sus enormes "rodillos" (cada uno tenía cinco centímetros de diámetro más o menos), después de que mis amigos y yo habíamos pasado medio día explorando el lugar bajo un implacable sol de estío para recoger apenas fragmentos dispersos aquí y allá de trilobites no muy grandes.

La mejor pieza que cobré en todo el verano fue un trilobite que saqué de un pozo en la primera hora de mi primera expedición a la "captura" de fósiles. Se trataba de un "rodillo" pequeño, de unos dos centímetros y medio de diámetro, cuyo estado de conservación era casi perfecto. Las facetas de sus ojos compuestos podían distinguirse con nitidez. Todos los demás que hallé en la zona hubo que extraerlos, con sumo esfuerzo, de las paredes de la cantera.

Supongamos que hemos ya localizado la situación de una zona de fósiles. Se impone entonces cartografiar la zona o



Grupo de trilobites fosilizados encontrados en Ohio



Crinoideo fósil

identificarla en un mapa de gran escala. Este procedimiento no sólo nos ayudará a recordar el lugar, sino que permitirá que otros prosigan las indicaciones. Si hay que señalar muchos yacimientos en un único mapa, podemos completarlo con el tipo y abundancia de fósiles existentes en cada uno. Si el mapa es topográfico o geológico, podrá predecirse la situación de otros posibles yacimientos de fósiles en la zona.

Fósil que se recoge, fósil que hemos de etiquetar. Se apunta el nombre del lugar de hallazgo y la fecha de éste en la caja donde se guarden. Se aconseja indicar también la profundidad o nivel de procedencia. Al regresar a ese lugar, se podrá continuar trabajando en el mismo nivel.

Los fósiles se encuentran en rocas sedimentarias, en algunas de las cuales resulta más fácil trabajar que en otras. Las piedras calizas de Ohio proporcionan a veces buenos ejemplares; pero, en general, su dureza constituye un obstáculo para la recolección de fósiles. Las arcillas de Ohio, más suaves y fáciles de abrir para localizar los fósiles, permiten una investigación más extensa por día que en el caso anterior. Además, cuesta mucho menos extraer un ejemplar de las suaves arcillas que de la roca más dura.

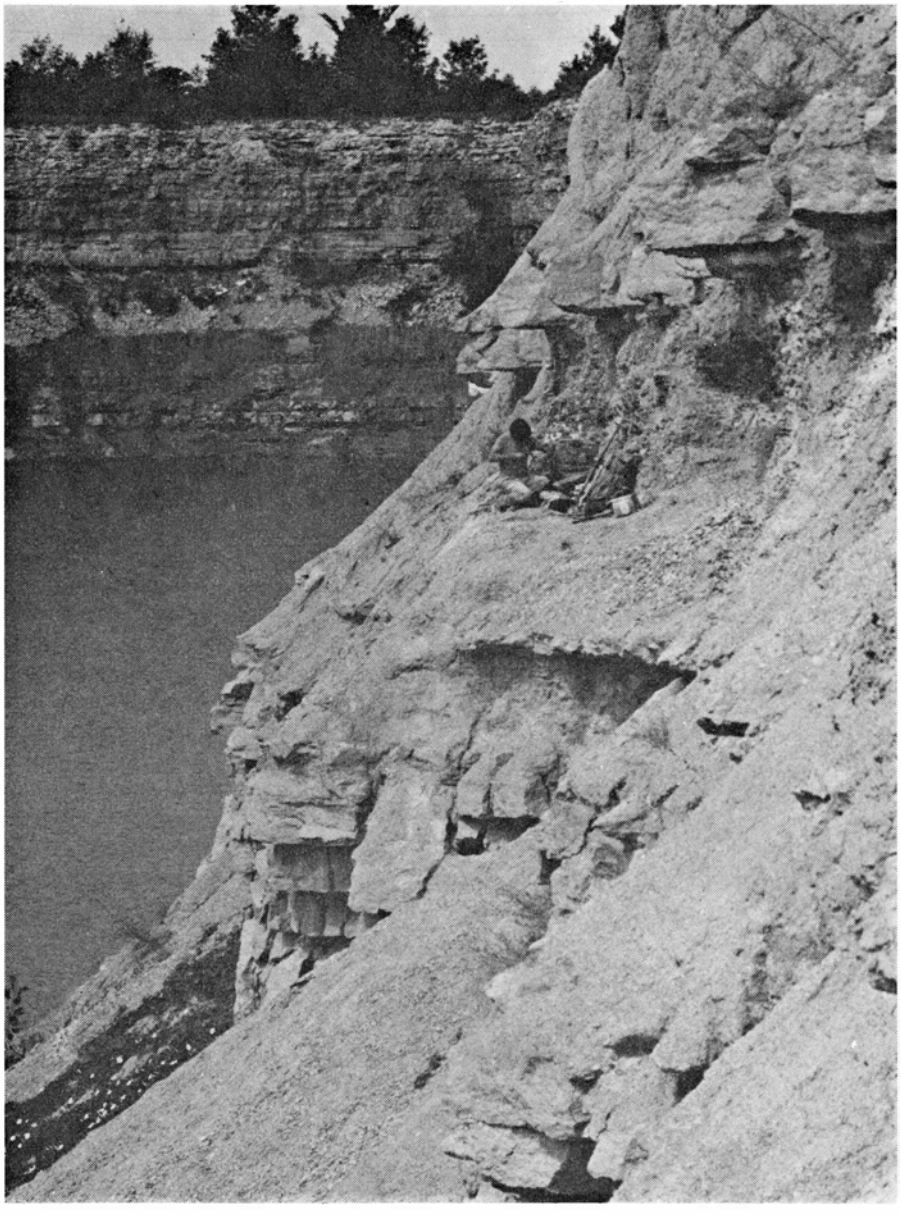
Si la roca fosilífera se encuentra en el lateral de un corte, tal como el abierto por una carretera, debería poder verse la continuación del estrato en el lado opuesto y contiguo del corte. Si el estrato es recto y contiene fósiles, pueden encontrarse éstos a todo lo largo del mismo. Si está muy plegado o muy fracturado, las expectativas son menos prometedoras porque, aun cuando un día hubiera tenido fósiles, se habrán destruido probablemente por el plegamiento o la fracturación.

La mayoría de los fósiles de mi colección los he conseguido en las márgenes de los ríos y en canteras. Uno y otro lugar pueden resultar peligrosos si hay mucha roca suelta por encima del horizonte de recogida. En los trabajos de cantera suelen quedar grandes rocas de arcilla al descubierto que parecen prometedoras. A Jeff Aubry, que posee una renombrada colección de fósiles de Ohio y los estados limítrofes, le cayó en cierta ocasión una roca en la cantera donde estuve el último verano; permaneció inconsciente durante algunas horas, y, si se hubieran desprendido más rocas podrían haberle matado. Aun cuando presumamos de expertos en la recogida de fósiles, hemos de andar con mucho cuidado al socavar rocas grandes y sueltas, por atractivo y prometedor que resulte el lugar.

Como estrategia general, una ladera se cava explanando un trecho de forma que podamos levantar y examinar las planchas de roca. Cuando trabajaba en una ladera, empezaba a cavar bastante más arriba del estrato que me interesaba. El corte inicial era lo suficientemente alto como para permitir que una línea recta vertical cruzara el estrato por lo menos a una distancia de un metro de profundidad de la ladera. Me llevó horas cavar lo sobrante, con un esfuerzo considerable de pico y pala. Aunque en alguna ocasión aparecían, en este sobrante, fósiles interesantes, lo normal era que sólo nos reportara un cansancio agotador.

Una vez clareado el trecho, la arcilla del horizonte que a mí me interesaba estaba al descubierto en una extensión de varios metros cuadrados. A lo largo de los laterales y de la parte de atrás de la zona expuesta, clavé largos escoplos hasta una profundidad de cuatro o cinco centímetros, con ayuda de un mazo; los aflojé balanceándolos un poco y los quité. Introduje luego con cuidado un formón largo, horizontal al plano lateral de la roca; lo hinqué varios centímetros más abajo de la superficie superior con el fin de sacar una plancha. Los agujeros hechos en la parte de atrás y en los lados facilitaron la adecuada fracturación de la misma.

Levantaba la plancha. Examinaba el fondo de ésta y la parte superior de la capa de arcilla subyacente. Si no veía fósiles po-



Buscador aficionado de fósiles en una repisa de una cantera próxima a Toledo (Estados Unidos)

nía la plancha de canto y la abría más veces golpeando con un escoplo pequeño o con un destornillador hacia el borde opuesto, ayudándome con el martillo. Aunque la arcilla se abre con facilidad, debe hacerse esta operación con mucho cuidado. He llegado a destruir trilobites preciosos por golpear demasiado fuerte.

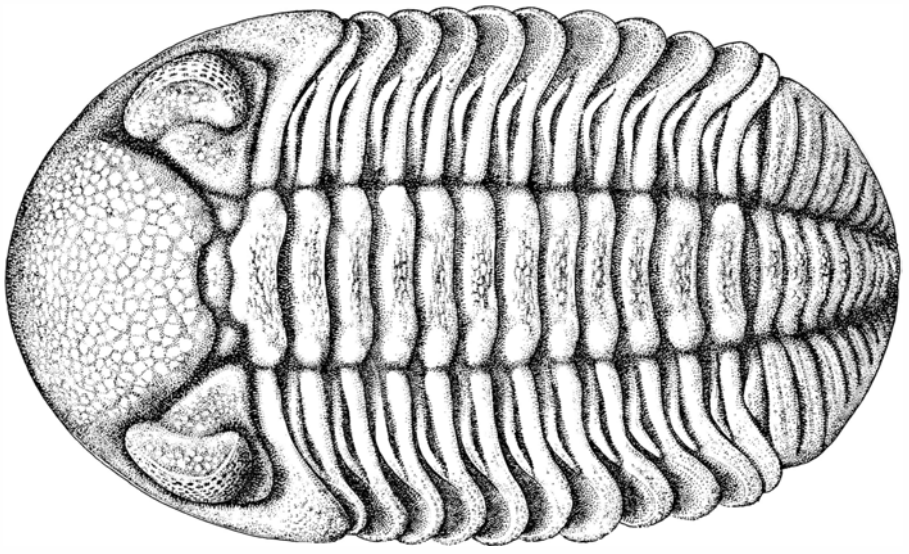
La labor de cavar y preparar las planchas es un trabajo muy duro, que puede ocuparnos horas e incluso días. Las ventajas de un trabajo prolongado y detallista aparecen cuando levantamos una plancha que encierra buenos ejemplares. Los fósiles simples pueden recuperarse cavando directamente en la pared, pero es muy posible que los tipos más delicados como los trilobites o los crinoideos complejos resulten dañados. Por otro lado, constituye un espléndido hallazgo levantar una placa que porte varias muestras de interés; la plancha fósil resultará mucho más impresionante que un simple ejemplar limpio y sacado de su molde.

Scott Vergiels, de Temperance, Michigan, me ha enseñado recientemente una plancha que había obtenido de una cantera próxima a Toledo. Contenía un crinoideo completo y siete trilobites. Era algo maravilloso. Vergiels me habló también de otra placa que había sacado Aubry de la cantera, y que contenía hasta 26 trilobites completos.

A no ser que el fósil que se descubra sea claramente sólido (algunos braquiópodos pueden serlo mucho), hay que dejarlo en su molde hasta llegar a casa. No soy partidario de limpiarlo en el campo. Si parte del fósil estuviera roto habrá que recoger los trocitos. Se pegan in situ al molde, de modo que pueda luego reconstruirse. Para ello servirá una cola blanca diluida, soluble en agua y, por tanto, que se pueda quitar fácilmente. Si el fósil amenaza ruina, le pongo también un poco de pegamento en los extremos a punto de desprenderse. Con las cerdas de un cepillo podemos introducir pegamento por debajo de los trozos sueltos y asegurarlos así en unos minutos.

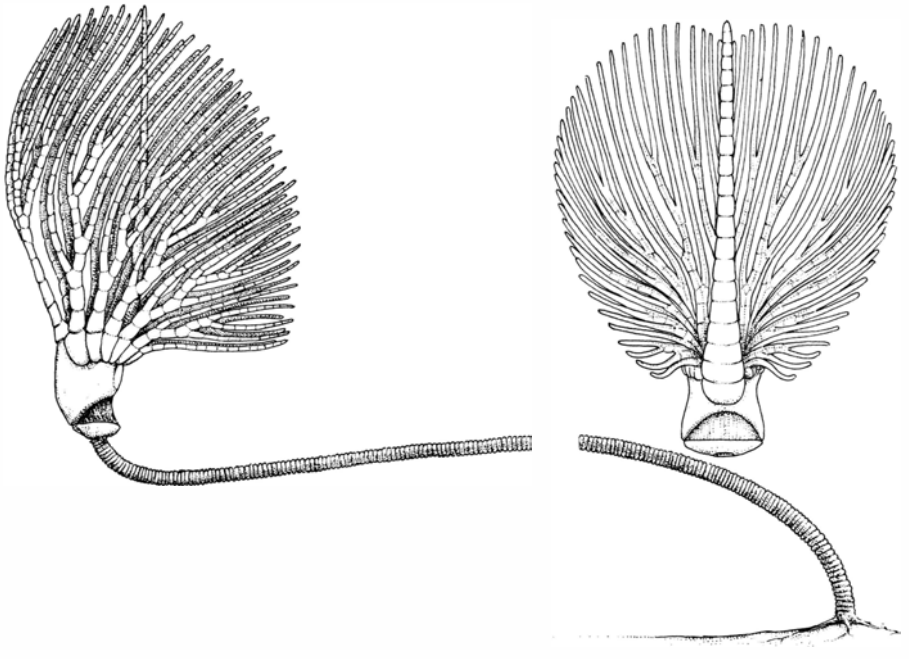
Muchos coleccionistas de fósiles prefieren transportar todas las planchas, excepto las muy grandes, en cestas. Si se usa una cesta o una caja, nunca pondremos un ejemplar sobre otro porque se estropean con facilidad. Si se envuelven los ejemplares en periódicos, servilletas de papel o gomaespuma, se pueden transportar en una mochila.

Con un cepillo de dientes viejo o incluso con un imperdible, podremos hacer la primera limpieza de muchos especímenes fósiles. Hube de andar con tiento con un fósil de trilobite que encontré en la arcilla; para quitar la arcilla de las grietas de los trilobites y dejar al descubierto las extremidades de los crinoideos se recurre a puntas metálicas.



Phacops rana milleri, *trilobite del Devónico medio*

Se puede realizar una limpieza excelente con una pistola de aire comprimido (un equipo de chorreo de arena miniatura) que muchos coleccionistas de fósiles han adquirido, a pesar de que su precio es hoy bastante elevado. La pistola arroja un polvo muy fino por una pequeña boquilla que se dirige al ejemplar en sentido oblicuo, eliminando la matriz sin dañar el fósil. Se pueden conseguir distintos tipos de polvos para diferentes tipos de fósil. Por ejemplo, un polvo duro (óxido de aluminio) puede ser el mejor para un braquiópodo duro, un polvo más blando (bicarbonato sódico) para el delicado trabajo que requiere limpiar un crinoideo. Si el fósil es más duro que la matriz que le rodea, la corriente de polvo se dirige a la superficie del fósil en ángulo oblicuo y la matriz de cal desprendida por el impacto. Cuando el fósil es más blando que la matriz, el chorro debe dirigirse hacia la matriz, para no alterar el fósil. La pistola de aire comprimido se utiliza únicamente si existe diferencia entre la dureza de la matriz y la del fósil, de suerte que el impacto del polvo pueda romper el recubrimiento de arcilla.

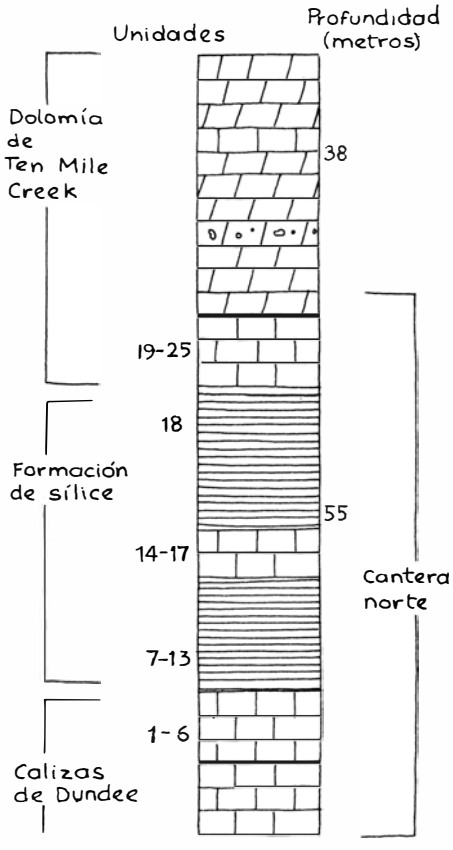


Cunctocrinus fortunatus *en visión de perfil* **(a la izquierda)** *y dorsal*

Para la reconstrucción de fósiles rotos son muy adecuados los útiles de dentista. Un trozo suelto puede recubrirse ligeramente de cola diluida e instalarlo en su sitio con un martillo de dentista. Habrá que succionar la punta de la herramienta para conseguir la adhesión entre ésta y la superficie seca de la pieza suelta.

Algunos productos químicos eliminan la arcilla o la caliza a través de una reacción que deja inalterado al fósil. Así, algunos ácidos eliminarán la caliza sin dañar la muestra, que es de dióxido de silicio. Con ejemplares incrustados en arcilla prefiero evitar el uso de productos químicos, ya que obtengo mejores resultados con un martillito de dentista y un equipo de chorreo. Sin embargo, cuando el ejemplar está en caliza, debe recurrirse a productos químicos.

La matriz o el molde en que se encuentra el fósil puede cortarse hasta un tamaño conveniente y aplanar entonces su parte posterior con un taladro casero provisto de un disco abrasivo (que se vende en ferreterías). El disco se monta en el taladrador como se acopla una broca. El alisamiento de la parte trasera de la roca (la matriz, no el fósil) permite pegarlo a un tablero. Roeser ha unido montajes de algunos de sus fósiles pegando la parte trasera alisada a un lienzo estirado en un marco, según es uso en pintura. Los fósiles pueden guardarse también en una vitrina.



Estratigrafía de la cantera

Mi trabajo más gratificante en busca de fósiles lo hice en una cantera de piedra cerca de Toledo. La cantera contiene parte del tipo de roca conocida por los coleccionistas de fósiles como formación de sílice, que se originó hace 350 millones de años en el Devónico medio. Era parte del mar donde hoy se halla la depresión de Michigan. En la depresión había un mar de agua salada que se extendió hasta Ontario y, durante algún tiempo, hasta Nueva York. En cuanto el mar se retiró y desapareció por elevación del terreno, la deformación y erosión de la superficie dejó expuesta y arrasó gran parte de la formación de sílice. Lo que hoy contemplamos abunda en yacimientos fósiles.

En la depresión de Michigan se han descubierto seis zonas de depósitos sedimentarios; sólo dos de ellas son importantes en la cantera de Toledo. Una, la denominada zona coral-braquiópoda, consta de caliza y arcillas calcáreas que contienen fósiles de corales y grandes braquiópodos, así como algunos briozoos, braquiópodos, ostrácodos, trilobites, corales y otros animales marinos.

Algunos sostienen que el viejo mar adyacente a la cantera no hubo de ser más hondo de unos 50 metros. Si hubiera sido más profundo, los corales no habrían recibido suficiente luz solar para su crecimiento. Si hubiera sido mucho menos profundo deberían aparecer muestras de turbulencia de la superficie entre los fósiles. El agua muy superficial sería probablemente demasiado violenta para los crinoideos y otros animales más bien frágiles. Se ha recogido mucha información sobre los fósiles de la cantera en un libro llamado *Strata and Megafossils of the Middle Devonian Silica Formation,* escrito por Robert V. Kesling y Ruth B. Chilman y publicado por la Universidad de Michigan, Museo de Paleontología, Ann Arbor, Michigan 48104.

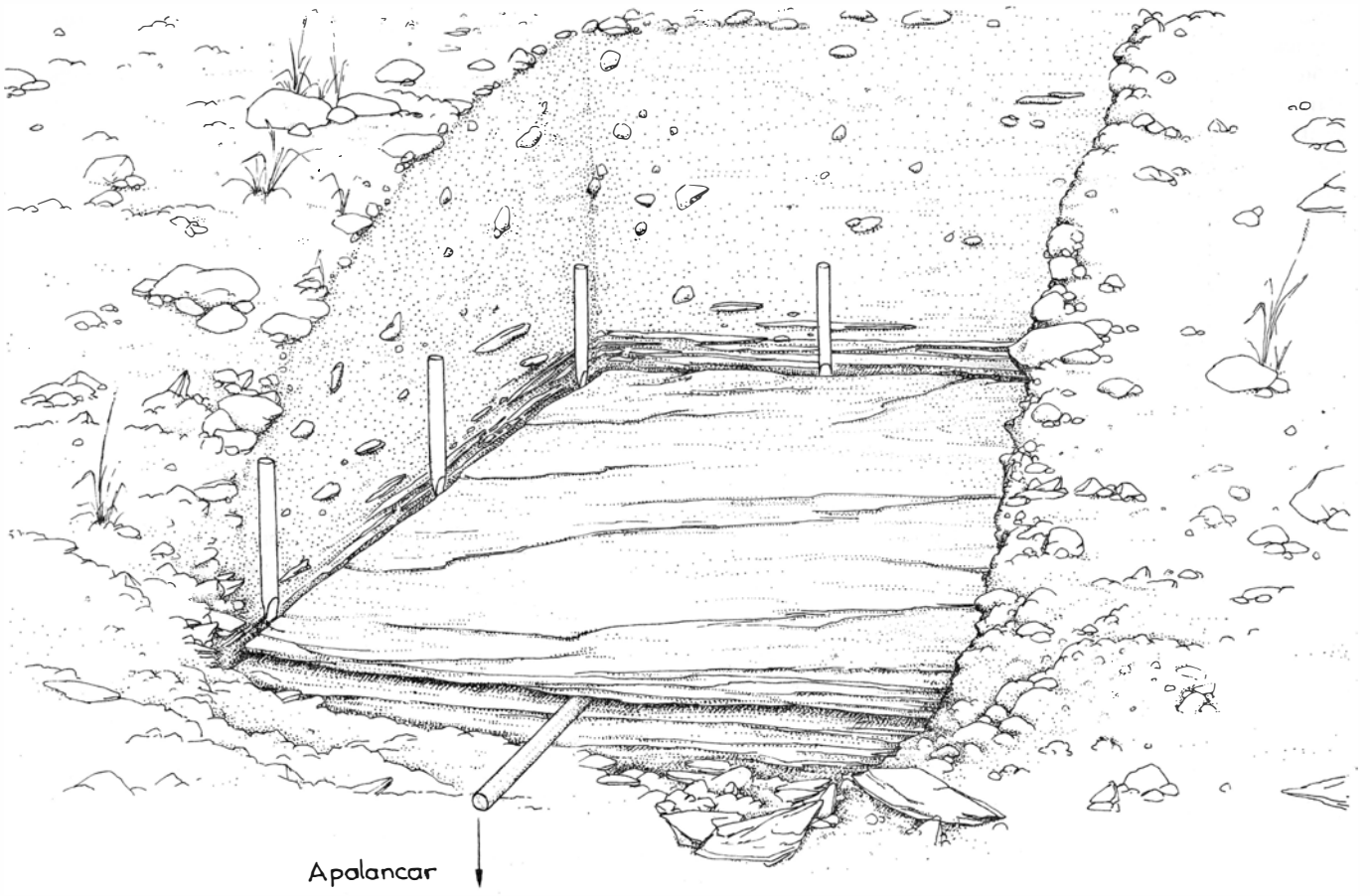
Una carretera corta la cantera en sector norte y sector sur. El sector meridional es más adecuado para los coleccionistas por hallarse todavía en explotación. El sector septentrional no se ha explotado durante años y está abierto a coleccionistas aficionados, aunque ha llegado a mis oídos el rumor de que los nuevos dueños van a cerrarla pronto. La parte norte está parcialmente inundada por el agua de los alrededores; la flanquean unos acantilados escarpados donde los estratos de caliza y arcilla que contienen fósiles están a la vista.

También se pueden encontrar fósiles en los trozos de arcilla y caliza desprendidos por las operaciones mineras y abandonados después por los alrededores. En la tierra llana del extremo norte de la cantera aparecen abundantes conchas y corales, donde las capas de fósiles, antes soterradas, han sido levantadas y expuestas. Aunque ya he explorado estos montones de rocas y los antiguos arrecifes, pasé mucho tiempo trabajando con un grupo de amigos sobre una repisa situada en la parte media de uno de los acantilados.

Los horizontes de roca que recorren los acantilados se han identificado y relacionado geológicamente con horizontes del sector sur de la cantera y con horizontes de otras zonas de la depresión de Michigan. La identificación se lleva a cabo etiquetando con series numéricas que empiezan en la piedra caliza subyacente a la arcilla. La unidad 11, una capa de arcilla fácil de trabajar, quedaba aproximadamente a nivel de la vista cuando me ponía de pie sobre la repisa. Bajo ella había un estrato fino de caliza dura. La unidad 10 tiene unos quince centímetros de espesor. (Los espesores de las diferentes unidades no son constantes a lo largo de toda la cantera.) A una altura algo inferior –la de mi cinturón más o menos– había un horizonte más espeso de arcilla. La unidad 9B, que se hunde unos dos metros más abajo, acaba en más piedra caliza bajo el suelo del borde. Aunque por debajo y por encima de mí había varios tipos de fósiles, concentré mis esfuerzos en la unidad 9B. En la parte superior de la unidad se habían recobrado varios ejemplares de trilobites en óptimas condiciones. Hacia el fondo de la unidad, estos escaseaban, si bien solían aumentar de tamaño.

En la formación de sílice predominan dos tipos de trilobites: el *Phacops rana crassituberculata* se encuentra normalmente en la unidad 8 (arcilla) y 10 (caliza). El *P. rana milleri* se localiza en las unidades 7 y 9. Puesto que los primeros están más abajo, debieron de existir en una etapa más antigua que los segundos, aunque algunas capas extraídas de la formación de sílice contienen ambos tipos de trilobites, lo que indica que durante algún tiempo coexistieron.

Para cavar en el acantilado, quité primero la capa de desechos sobre el horizonte elegido y dividí luego grandes capas de roca arcillosa. Por la mañana temprano cavaba en la pared a la altura del rostro, picando y retirando hacia atrás el material medio metro, aproximadamente. El corte medía algo más de



Cómo quitar una capa plana de arcilla

un metro de ancho. Después extendía el corte hacia abajo, picando la caliza dura sin miramientos y prestando más atención en el terreno arcilloso. La mayor parte de la arcilla estaba disgregada porque se hallaba cerca de la superficie. La filtración de agua la había hecho tan quebradiza que se deshacía en mis manos. Sólo hallé braquiópodos muy duros.

Mediada la tarde, había rebajado el terreno por encima de las rodillas. El corte profundizaba más en la pared debido a la pendiente. La arcilla, menos suelta, podía hendirse en grandes placas. En ese nivel empecé a trabajar más despacio por miedo a romper los fósiles. Algunos de mis amigos más robustos consiguieron sacar placas de hasta 50 kilogramos y más. Estas placas tan grandes son de muy difícil manejo, pero ahorran mucho tiempo al coleccionista. Un viejo aforismo conocido entre buscadores de fósiles reza así: cuanto más pueda cavarse en un lugar prometedor, mayores serán las oportunidades de hallar ejemplares raros y preciados. Algunos de mis amigos trabajaban cual palas humanas, haciendo grandes cortes en la ladera al día.

Cuando me acercaba a un buen espécimen, disminuía el ritmo de mi trabajo. Normalmente un trilobite arrollado era lo bastante fuerte como para que tanto él como su matriz pudieran ser desprendidos de una gran plancha sin grave peligro de su integridad. Los trilobites planos y todos los crinoideos requerían mayor cuidado. En general había que aplicarles un poco de pegamento blanco diluido antes de poder sacar su matriz sana y salva de la plancha. No es fácil extraer ilesos los crinoideos si la suerte no nos acompaña y acertamos romper en dos la plancha justo por el sitio adecuado. Pero si la fortuna nos es esquiva, habrá que trabajar con paciencia empleando pequeños formones y delicados golpes de martillo para seguir toda la longitud de un crinoideo y extraer la plancha en la que se encuentra. No hay espectáculo más frustrante que una línea de fractura que atraviese un espécimen formidable de crinoideo o trilobite.

Los trilobites cambiaban la concha periódicamente a lo largo de su vida, mudando su exoesqueleto para formar otro nuevo y mayor. Estas mudas son relativamente abundantes en las arcillas, a veces resultan decepcionantes cuando uno esperaba recuperar un trilobite entero. Yo encontré un trilobite que había muerto después de la muda y antes de que su nuevo exoesqueleto se endureciera. Estos ejemplares, que los coleccionistas llaman "conchas blandas", son difíciles de hallar pues se confunden con el color de la arcilla mejor que un trilobite fósil normal; también cuesta más su recuperación total debido a la fragilidad del fósil. Los apéndices y la parte blanda inferior fosilizados de los trilobites son escasos y no se encuentran en absoluto en la formación de sílice. Los exoesqueletos conservados están constituidos por carbonato y fosfato cálcicos que han endurecido la cubierta original de quitina.

La unidad 9 contiene, además, trilobites, filocáridos, moluscos, grandes braquiópodos y otros muchos fósiles. Uno de mis compañeros, Zarko Ljuboja, excavó una plancha que contenía nueve estrellas de mar fósiles en la misma losa. He presenciado cómo varios trilobites tanto planos como arrollados se desprendían de las arcillas. Desgraciadamente, me encontraba siempre junto a la persona que daba con tan magnífica presa, pero nunca en el lugar preciso para que fuera mía.

De todos los fósiles que he hallado o visto, los trilobites siguen siendo los más fascinantes, particularmente por la vía evolutiva que tomaron. En el mundo se han identificado muchos tipos diferentes de trilobites de distintos tamaños y formas, variando la longitud de los adultos entre seis milímetros y 75 centímetros. Los más antiguos corresponden a los primeros tiempos del Cámbrico (hace unos seiscientos millones de años); en el Paleozoico medio se habían especializado y al final del Pérmico (hace 225 millones de años) decayeron y desaparecieron. Durante su fase de máximo desarrollo abundaron en aguas someras, alimentándose de pequeños organismos y desperdicios orgánicos de los fondos fangosos. A juzgar por la gran cantidad de trilobites del tipo arrollado que se ha encontrado en yacimientos de fósiles, muchos de ellos murieron en una época en que dominaba esa conformación.

Las adaptaciones de los trilobites les indujeron a tomar varios caminos en su evolución. Así, los ojos diferían nítidamente de una especie a otra. Unas tenían ojos pequeños en forma de media luna; otras, ojos grandes que dominaban su rostro; éstas, pequeños y montados sobre pedúnculos que se extendían desde el rostro; aquéllas carecían de tales órganos. El lector puede imaginar por qué los ojos evolucionaron de esta manera. Los ojos grandes pudieron ser de trilobites de aguas profundas donde la luz era tenue. Los ciegos quizá no necesitaron de la vista, toda vez que vivían enterrados en el fango. Los trilobites que contemplé en la cantera de Toledo tenían ojos compuestos con las facetas dispuestas de forma distinta en las dos subespecies. Los ejemplares de *P. rana milleri* presentaban ojos con ocho facetas en cada línea vertical y una media de 104 facetas por ojo. Los de *P. rana crassituberculata* tenían ojos con seis o siete facetas en línea vertical y sólo 77 facetas por ojo.

En algunos trilobites, cada faceta del ojo compuesto constaba de dos capas de material, dispuestas de suerte que las superficies exterior e interior fueran convexas; la forma de la superficie entre las dos capas era un tanto más compleja. De acuerdo con la investigación realizada por el paleontólogo Euan N.K. Clarkson, de la Universidad de Edimburgo, y el físico Ricardo Levi-Setti, de la Universidad de Chicago, la forma de esta lente compuesta se aproxima al tipo ideal para eliminar la aberración esférica.

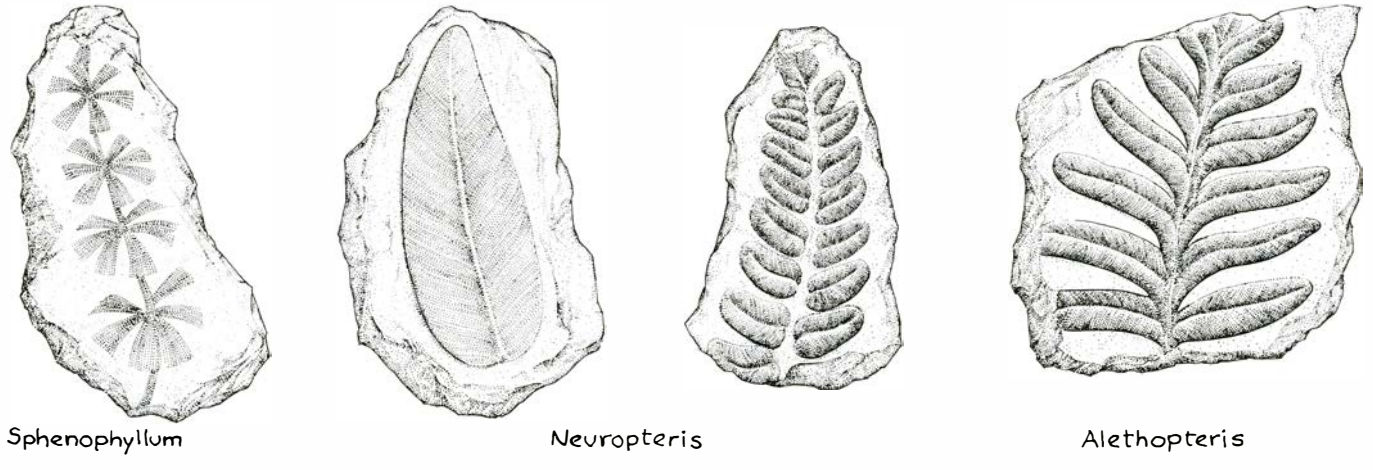
La capa exterior del ojo del trilobite está constituida por calcita, un mineral birrefringente del tipo del que me ocupé en esta misma sección en febrero de 1978. En general, cuando la luz pasa a través de un cristal birrefringente, se divide en dos rayos de acuerdo con la polarización de los mismos con respecto a los ejes del cristal. Esta separación de los rayos de luz habría permitido una interpretación del hábitat de un trilobite virtualmente imposible, pero la evolución los ha dotado de una lente con el cristal de calcita orientado de manera ventajosa. Cuando la luz entraba en el cristalino, viajaba a lo largo del eje óptico del mismo y no era afectada por la birrefringencia. El trilobites veía, pues, una sola imagen.

También he coleccionado un número de fósiles de plantas en una mina abandonada en las colinas del centro-este de Ohio. Se habían puesto en la superficie grandes cantidades de arcillas, aunque todas ellas desprovistas de fósiles. En un extremo de la zona afectada por la mina, en un lateral de la pequeña colina, un arroyo se había abierto camino en una capa más baja de arcilla. A lo largo de las laderas del río, la arcilla estaba llena de plantas fósiles.

Roeser y yo cavamos en estos laterales, los limpiamos y por fin conseguimos hallar un área de trabajo plana en la capa de arcilla. Aunque las plantas fósiles eran abundantes, fue difícil recuperar un ejemplar completo debido a la orientación de las mismas y a la naturaleza de la roca donde se encontraban. Donde los fósiles marinos de la formación de sílice eran normalmente bien expuestos al abrir una plancha de arcilla, las plantas fósiles estaban orientadas casi al azar en la misma. Cuando abría una de estas planchas, la fractura tenía muchas posibilidades de discurrir justo a través de varios especímenes. No obstante, los fósiles eran tan abundantes que al final del día tanto Roeser como yo teníamos muchos.

La mayor parte de las plantas fósiles de este lugar parecían ser helechos de semilla, plantas parecidas a los helechos que portan semillas en vez de esporas como los helechos auténticos. Encontramos ejemplares de *Sphenophyllum,* que tiene una hilera circular de hojas en forma de abanico al final de un tallo fino. También había *Alethopteris,* cuyas largas hojitas se extienden hacia los lados desde un tallo central con una vena prominente. Sacamos algunas otras plantas pteridofiliformes (*Pecopteris* y *Neuropteris*). Roeser descubrió una capa de *Sphenophyllum* que se extendía por la ladera en una ligera ranura de tres metros por lo menos.

Todas estas plantas estaban depositadas en una laguna de fango pestilente hace entre 230 y 320 millones de años. Dado que las plantas no estaban endurecidas por materia mineral, su conservación dependía totalmente de la ausencia de oxígeno y bacterias aeróbicas. Parece ser que las plantas que descubrimos Roeser y yo habían caído en las aguas estancadas y habían sido cubiertas por el fango antes de pudrirse.



Fósiles de los helechos **Sphenophyllum, Neuropteris** *y* **Alethopteris**

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA SEGURIDAD DE LOS REACTORES DE FISION

RISK ASSESSMENT REVIEW GROUP REPORT TO THE U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. H. W. Lewis, R. J. Budnitz, H. J. C. Kouts, F. von Hoppel, W. B. Loewenstein y F. Zachariasen. U.S. Nuclear Regulatory Commission, National Technical Information Service, 1975.

REPORT OF THE PRESIDENT'S COMMISSION ON THE ACCIDENT AT THREE MILE ISLAND. THE NEED FOR CHANGE: THE LEGACY OF T.M.I. John G. Kemeny, Bruce Babbitt, Patrick E. Haggerty, Carolyn Lewis, Paul A. Marks, Cora B. Marrett, Lloyd McBride, Harry C. McPherson, Russell W. Peterson, Thomas H. Pigford, Theodore B. Taylor y Anne D. Trunk. U.S. Government Printing Office, 1979.

THREE MILE ISLAND AND THE FUTURE OF NUCLEAR POWER. Número especial de *IEEE Spectrum*, vol. 16, n.º 11; noviembre, 1979.

ESTRUCTURA INTERNA DEL PROTON

ASYMPTOTIC FREEDOM: AN APPROACH TO STRONG INTERACTIONS. H. David Politzer en *Physics Reports*, vol. 14C, n.º 4, págs. 129-180; nov., 1974.

LARGE TRANSVERSE MOMENTUM PROCESSES. Dennis Sivers, Stanley J. Brodsky y Richard Blankenbecler en *Physics Reports*, vol. 23C, n.º 1, págs. 1-121; enero, 1976.

RECENT RESULTS ON ELECTRON-POSITRON ANNIHILATION ABOVE 2 GEV. G. J. Feldman y M. L. Perl en *Physics Reports*, vol. 33C, n.º 5, págs. 285-365; octubre, 1977.

GENES ASESINOS EN BACTERIAS DE VIDA LIBRE

KAPPA AND OTHER ENDOSYMBIONTS IN *PARAMECIUM AURELIA*. J. R. Preer, jr., L. B. Preer y A. Jurand en *Bacteriol. Rev.*, vol. 38, págs. 113-163; 1974.

"SPIRAL-BODIES" - INTRACYTOPLASMIC MEMBRANEOUS STRUCTURES IN A HYDROGEN OXIDIZING BACTERIUM. J. Lalucat y F. Mayer en *Z. Allg. Mikrobiologie*, vol. 18, págs. 517-521; 1978.

REFRACTILE BODIES IN A NEWLY ISOLATED FREE LIVING HYDROGEN OXIDIZING BACTERIUM. J. Lalucat, O. Meyer, F. Mayer, R. Parés y H. G. Schlegel en *Arch. Microbiol.*, vol. 121, págs. 9-15; 1979.

ENFERMEDADES CAUSADAS POR DEFECTOS EN LA COMUNICACION INTERCELULAR

BEHAVIORAL NEUROCHEMISTRY: NEUROREGULATORS AND BEHAVIORAL STATES. Jack D. Barchas, Huda Akil, Glen R. Elliott, R. Bruce Holman y Stanley J. Watson en *Science*, vol. 200, n.º 4344, págs. 964-973; 26 de mayo de 1978.

PREPARATION OF RADIOLABELED THYROID-STIMULATING IMMUNOGLOBULINS (TSI) BY RECOMBING TSI HEAVY CHAINS WITH ^{125}I-LABELED LIGHT CHAINS: DIRECT EVIDENCE THAT THE PRODUCT BINDS TO THE MEMBRANE THYROTROPIN RECEPTOR AND STIMULATES ADENYLATE CYCLASE. S. Qasim Mehdi y Joseph P. Kriss en *Endocrinology*, vol. 103, n.º 1, págs. 296-301; julio, 1978.

ENTRY OF INSULIN INTO HUMAN CULTURED LYMPHOCYTES: ELECTRON MICROSCOPE AUTORADIOGRAPH ANALYSIS. I. D. Goldfine, A. L. Jones, G. T. Hradek, K. Y. Wong y J. S. Mooney en *Science*, vol. 202, n.º 4369, págs. 760-762; 17 de noviembre de 1978.

LA ROTACION DE LOS COMETAS

THE PREDICTION OF ANOMALOUS TAILS OF COMETS. Zdenek Sekanina en *Sky and Telescope*, vol. 47, n.º 6, págs. 374-377; junio, 1974.

BACKGROUND OF MODERN COMET THEORY. Fred L. Whipple en *Nature*, vol. 263, n.º 5572, págs. 15-19; 2 de septiembre de 1976.

EL CITOCROMO C Y LA EVOLUCION DEL METABOLISMO ENERGETICO

THE CYTOCHROME FOLD AND THE EVOLUTION OF BACTERIAL ENERGY METABOLISM. Richard E. Dickerson, Russell Timkovich y Robert J. Almassy en *Journal of Molecular Biology*, vol. 100, n.º 4, págs. 473-491; 5 de febrero de 1976.

THE PHOTOSYNTHETIC BACTERIA. Dirigido por Roderick K. Clayton y William R. Sistrom. Plenum Press, 1978.

THE CYTOCHROMES *C*: AN EXERCISE IN SCIENTIFIC SERENDIPITY. Richard E. Dickerson en *UCLA Forum in Medical Science, vol. 21: Evolution of Protein Structure and Function*. Dirigido por D. S. Sigman y M. A. B. Brazier. Academic Press, 1980.

EVOLUTION AND GENE TRANSFER IN PURPLE NONSULFUR PHOTOSYNTHETIC BACTERIA. Richard E. Dickerson en *Nature*, vol. 283, n.º 5743, págs. 210-212; 10 de enero de 1980.

FISICA DEL SALTO MORTAL Y DEL SALTO EN TIRABUZON

THE REORIENTATION OF A HUMAN BEING IN FREE FALL. Preston G. Smith y Thomas R. Kane. Technical Report n.º 171, Stanford University, sin publicar, 1967.

THE TECHNIQUES OF SPRINGBOARD DIVING. Charles Batterman. The MIT Press, 1968.

DO SPRINGBOARD DIVERS VIOLATE ANGULAR MOMENTUM CONSERVATION? Cliff Frohlich en *American Journal of Physics*, vol. 47, n.º 7, págs. 583-592; julio, 1979.

ESCARABAJOS CORNUDOS

HORNED BEETLES: A STUDY OF THE FANTASTIC IN NATURE. Gilbert J. Arrow. Dr. W. Junk, Publishers, 1951.

LIFE ON A LITTLE KNOWN PLANET. Howard Ensign Evans. E. P. Dutton & Co., Inc., 1968.

SEXUAL SELECTION AND REPRODUCTIVE COMPETITION IN INSECTS. Dirigido por M. S. Blum y N. A. Blum. Academic Press, 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

ONE MORE RIVER TO CROSS. T. H. O'Beirne en *Puzzles and Paradoxes*. Oxford University Press, 1965.

STRUCTURAL MODELS: AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF DIRECTED GRAPHS. Frank Harary, Robert Z. Norman y Dorwin Cartwright. John Wiley & Sons, Inc., 1965.

TALLER Y LABORATORIO

INVERTEBRATE FOSSILS. Raymond C. Moore, Cecil G. Lalicker y Alfred G. Fischer. McGraw-Hill Book Company, 1952.

THE ELEMENTS OF PALEONTOLOGY. Rhona M. Black. Cambridge at the University Press, 1970.

Taller y laboratorio

Ilusiones ópticas creadas por una composición puntual y "nieve" de la pantalla del televisor

Jearl Walker

Propio de la percepción humana parece ser tratar de poner orden en el desorden. Vamos a comentar dos ilusiones fundadas en esa inclinación. Constituye la primera aquella disposición de puntos situados al azar que, vistos de una determinada manera, se diría que forman círculos concéntricos. La otra ilusión tiene que ver con las figuras y movimientos que aparecen en la pantalla del televisor sintonizado en un canal que no emite señales. La "nieve" que sale, sin orden ni concierto, en la pantalla puede ordenarse mediante un proceso visual.

Fue el año pasado cuando me interesé por vez primera sobre las representaciones puntiformes aleatorias. A. G. Klein, de la Universidad de Melbourne, me había escrito, y con la carta, venía una trasparencia de puntos distribuidos al azar; no tendrían unos el milímetro de diámetro, pero otros sí medían varios milímetros. Klein había fotografiado una hoja de papel sobre la que había desparramado polvo de grafito. Adjuntaba en su envío una copia de la transparencia.

Siguiendo las instrucciones de Klein alineé la transparencia sobre la fotocopia. Comencé a girar con suavidad la transparencia sobre un punto central. De repente, los puntos dispersos sin orden comenzaron a formar círculos concéntricos alrededor del punto de rotación. Aunque los círculos no eran perfectos, daban la impresión de que estaban trazados con ajustada exactitud. ¿Por qué el sistema visual del observador impone orden en el desorden?

Cualquiera puede fabricarse transparencias similares de puntos distribuidos al azar. Basta, por ejemplo, con introducir un viejo cepillo de dientes en un bote de pintura y luego rociar con él una superficie pasando un dedo por entre las cerdas. Podemos rociar la pintura sobre un papel y sacar luego una transparencia de la composición, o bien rociar directamente una hoja de plástico. Podemos intercalar también dos hojas de papel carbón entre una hoja de papel normal y otra de acetato. Las hojas de papel carbón se disponen reverso contra reverso. Se golpean luego las cuatro hojas repetidamente con las cerdas de un cepillo. Los puntos de impacto aparecerán como motas idénticas tanto en el papel normal como en el acetato. Algunos prefieren fotografiar un papel de lija, como D. M. MacKay, de la Universidad de Keele en Inglaterra, quien en 1964 señaló que podía contemplarse la ilusión de los círculos y espirales con los positivos y negativos de una fotografía del papel de lija. Cualquiera que sea la técnica, basta una ligera rotación de los dos modelos, una vez alineados, para producir la ilusión de los círculos concéntricos.

Leon Glass, de la Universidad de Rochester, pasó diez años investigando este efecto. En 1969 describió algunas de las observaciones sencillas que pueden hacerse con los modelos de puntos distribuidos al azar; y sacó sus propias conclusiones sobre los aspectos del sistema de percepción responsable de dicha ilusión. En 1973 Glass y Rafael Pérez publicaron los resultados de una variedad de experimentos sobre este tema. Ellos mismos fabricaron modelos con un generador de configuraciones pseudoaleatorias mediante un programa Fortran de computador. El computador elegía la posición de los puntos; éstos se dibujaban con un trazador automático; luego los gráficos volvían a repetirse a mano y se hacían las transparencias.

En algunos experimentos los modelos sobre papel y sobre transparencias eran del mismo tamaño, y así la alineación resultaba precisa. En otros, se reducía uno de los modelos y sólo cabía alinear entonces una pequeña zona. Cuando los dos modelos eran del mismo tamaño, el efecto observado por Glass y Pérez era el mismo que ya hemos descrito. Pero si los modelos discrepaban en su tamaño, podían contemplarse dos efectos distintos. Uno de ellos ocurría siempre que el experimentador alineaba los puntos en una pequeña zona y evitaba que la transparencia girase con respecto al papel. Los modelos así superpuestos daban la apariencia de una explosión. Bastaba una ligera rotación de la transparencia sobre el papel para transformar la explosión en una composición que recordaba las galaxias espirales.

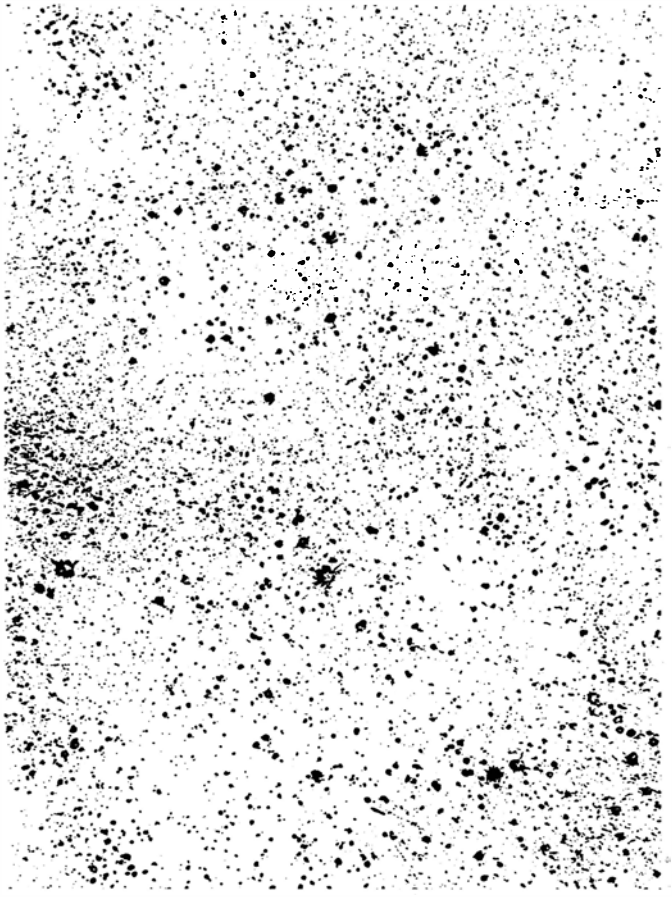
Glass y Pérez se dieron cuenta de que si sólo se recogía una pequeña sección de los modelos superpuestos, la ilusión de los círculos, las explosiones o las espirales se hacía menos evidente, si es que no desaparecía por completo. Las ilusiones dependen de una correlación que establece el observador entre pares de puntos apropiados de los modelos (los que coincidirían si los modelos tuvieran la misma escala y mantuvieran una alineación cabal). Al girar los modelos, los pares se separan. El observador, evidentemente, contempla el cuadro completo, correlacionando los pares separados. De algún modo, la correlación provoca la ilusión. Ahora bien, si el campo visual se limita a una pequeña sección del modelo, el observador no consigue establecer una correlación idónea u ocurre quizá que el número de correlaciones no resulta suficiente para que la ilusión aparezca.

En otro montaje experimental, Glass y Pérez sacaron transparencias negativas de un modelo; obtuvieron así puntos blancos sobre un fondo negro. Las transparencias, aunque idénticas, una estaba girada con respecto a la otra. Colocaron las transparencias en un proyector estereoscópico para que el observador contemplara ambas a la vez. La intensidad de la luz de cada transparencia podía controlarse de forma independiente con dos pares de filtros polarizadores cruzados, un par ante cada transparencia. Si el observador quería rebajar la intensidad de la luz de la transparencia de la derecha, rotaba uno de los filtros de la pareja que estaba situada frente a dicha transparencia.

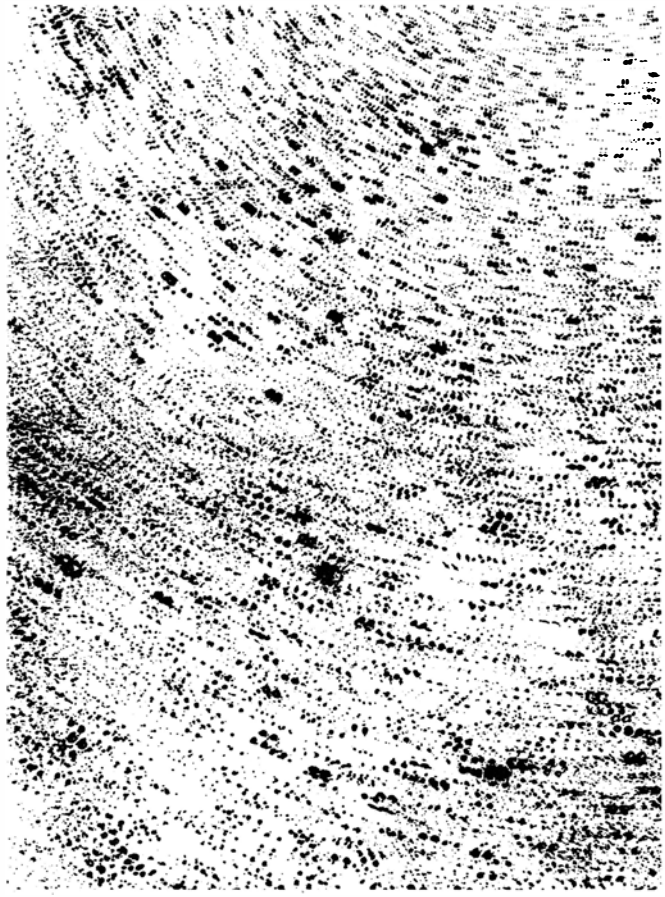
En uno de esos experimentos introdujeron una variante: pusieron transparencias idénticas girada una respecto a la otra. A medida que la intensidad de la luz de una transparencia decrecía, los círculos parecían girar. Supongamos, por ejemplo, que la transparencia P' estaba inicialmente girada en el sentido de las agujas del reloj respecto de la otra transparencia P. Al disminuir la intensidad de la luz de P' los círculos irreales rotaban en sentido contrario al de las agujas del reloj.

Cuando los experimentadores trabajaban con transparencias que normalmente producían la ilusión de una clara explosión, un cambio de intensidad en la luz de una transparencia determinaba que el tamaño de la figura pareciese variar. Si rebajaban la intensidad de la luz procedente de la transparencia que tenía la figura mayor de ambas, el modelo daba la impresión de hundirse.

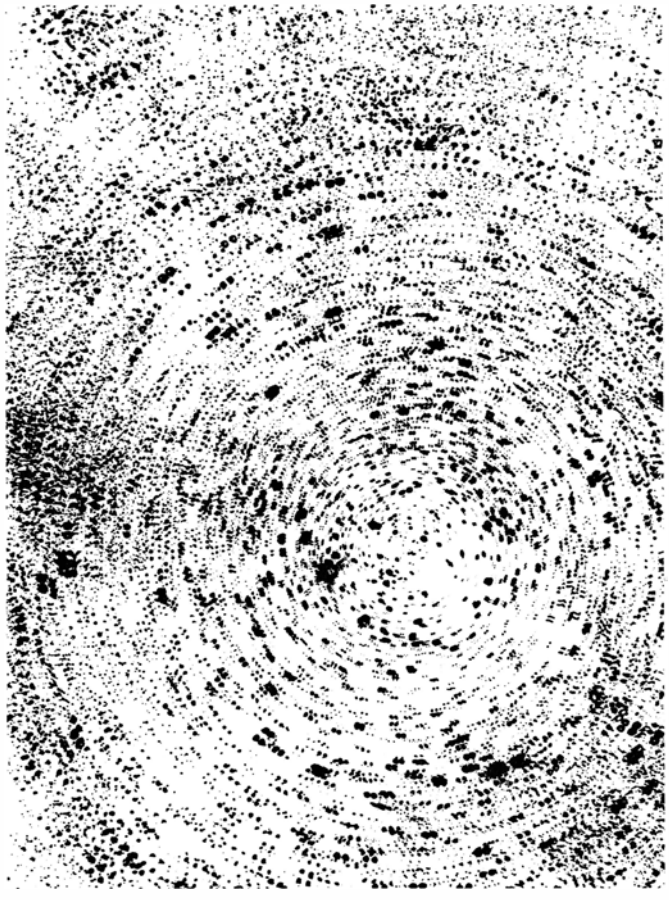
Glass y Pérez también experimenta-



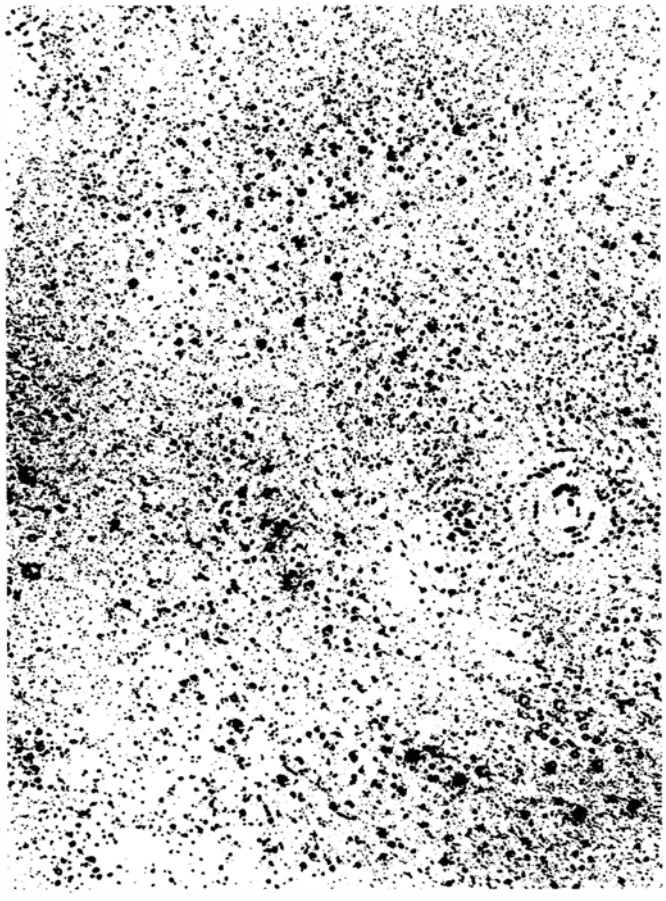
Transparencia de puntos aleatorios de A. G. Klein



Leve rotación de la transparencia sobre una copia de la misma



Resultado de una rotación más enérgica



Desvanecimiento de la ilusión por rotación excesiva

ron con filtros de colores puestos en la trayectoria de la luz procedente de cada una de las transparencias. Conseguían así dar colores diferentes a cada conjunto de puntos. Persistía la ilusión de los círculos y de otras figuras. Más aún, si se modificaba la intensidad de la luz de un cuadro, volvía a hacer acto de presencia la ilusión de movimiento (rotación, contracción o expansión).

Cuando me entretuve con la transparencia y su copia que Klein me envió, alineé primero las dos con la máxima atención. Elegí un punto de la transparencia y situé en él, haciendo presión, la punta de un lápiz; me apresté a girar lentamente la transparencia hasta que comenzó a aparecer la ilusión del círculo para grandes radios contando a partir del centro de rotación. La ilusión requiere la separación de los puntos correlacionados, lo que empieza antes en los radios grandes que en la zona más próxima al punto de pivotación. Rotaciones más amplias alejaban los puntos más próximos del centro de rotación y hacían que la ilusión se desplazara hacia el centro. Con el tiempo, cuando la rotación alcanza una velocidad elevada, la ilusión se desvanece y sólo se ve un cuadro de puntos relativamente denso y ordenado.

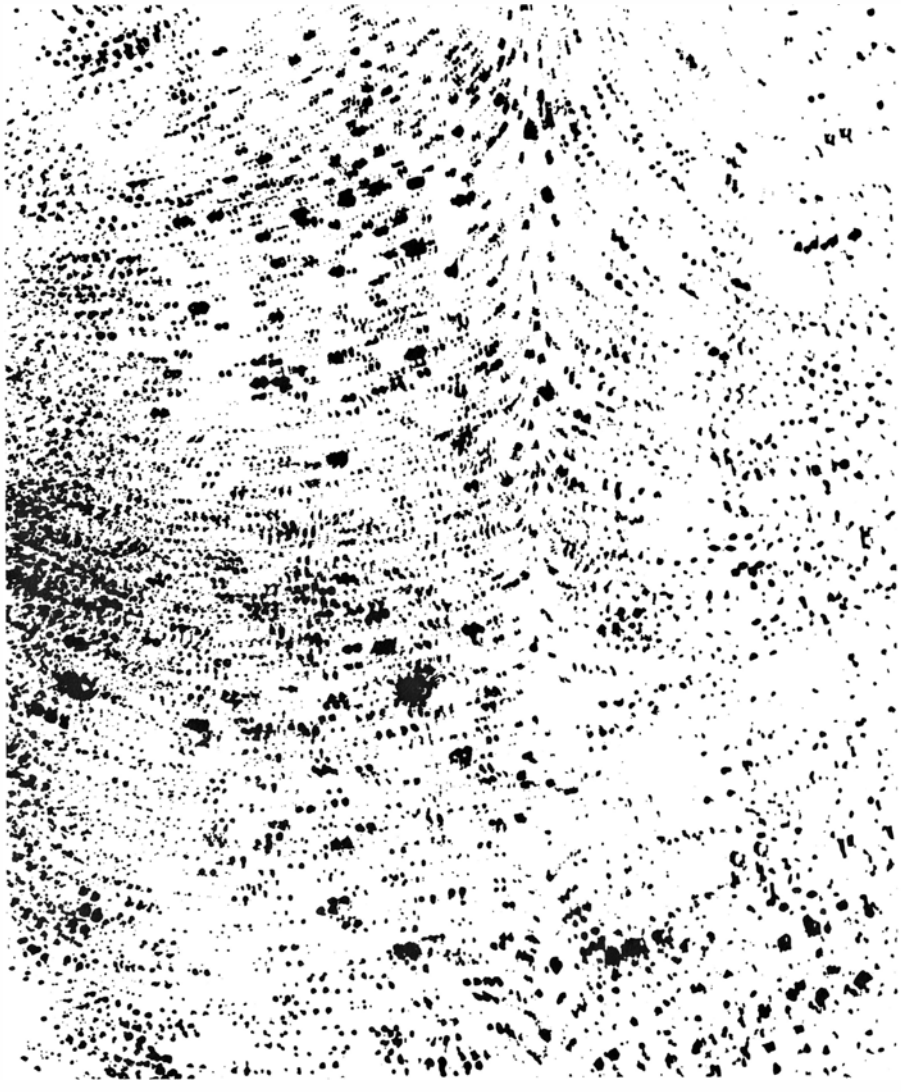
Los puntos más pequeños resultan de una eficacia mayor, a la hora de producir el efecto. Ello se debe quizás a que los puntos grandes necesitan de una rotación mayor para conseguir la adecuada separación, y, para entonces, muchos de los puntos pequeños no favorecen ya la ilusión. Un par de puntos dan su máxima contribución cuando están separados por una distancia igual a varias veces su diámetro. En las zonas relativamente densas de la figura, el efecto es débil a causa de que cuando dos puntos en relación se han alejado, otros puntos próximos interfieren la separación provocando la confusión.

Para modificar la dirección de propagación de los círculos en la ilusión, presionaba con mis dedos pulgares la parte inferior de la transparencia. Un golpe hacia arriba con el pulgar derecho generaba círculos con su centro hacia la izquierda; un golpe hacia arriba con el pulgar izquierdo generaba círculos con sus centros hacia la derecha. Con un ajuste intermedio logré que las líneas del efecto fueran rectas y no curvas. Al deslizar la transparencia sobre la copia con brusquedad, obtuve un efecto adicional: una onda blanca barría la página. La zona blanca aparecía en la región donde los puntos estaban alineados y así originaban la ilusión de líneas circulares. El resto de la página tenía líneas curvadas de varias clases. Conforme deslizaba la transparencia, el área de alineamiento se movía sobre la página y por tanto también lo hacía la región blanca.

Traté entonces de producir la ilusión de los círculos cambiando la transparencia de sitio y colocándola arriba y alineando varios puntos suyos con otros de la copia. La alineación no podía menos que resultar imperfecta, excepto para unos cuantos puntos que acertaban a tener aproximadamente el mismo tamaño y se hallaban en el sitio adecuado. Cuando, al girar, sacaba la transparencia de su correcta alineación, no había lugar para ilusiones. Como yo suponía, la ilusión requiere que sean bastantes los puntos de coincidencia. Era manifiesto que la mayoría de los puntos de la lámina debían hallarse en estrecha alineación con su correspondiente copia. Glass y Pérez andaban en lo cierto: la ilusión aparece de un examen "global" de la composición de puntos y no del examen de algunos pocos.

De la misma disposición pude deducir el tamaño mínimo del cuadro que debía observarse para seguir manteniendo la ilusión. Ajusté primero la transparencia con su copia al objeto de obtener la mejor ilusión de círculos. Cubrí la transparencia con una hoja de papel en la que había recortado un cuadrado. Según los distintos tamaños del agujero podían verse diferentes modelos. Si el área de visión sólo alcanzaba unas cuantas veces el tamaño medio de los puntos, la ilusión aparecía muy débil, si es que surgía. Pero si aumentaba dicha área hasta aproximadamente veinte veces el tamaño de los puntos, la ilusión era obvia. A mí me pareció observar una buena ilusión cuando el área visible multiplicaba por cincuenta el tamaño medio de los puntos.

Cuando levantaba ligeramente la transparencia de la fotocopia, la ilusión se transformaba, de círculos concéntricos, en explosiones o espirales. Glass y Pérez lograron ilusiones de este jaez superponiendo figuras que eran idénticas en todo menos en su escala. Llegué al mismo resultado porque, al acercarme la



Efecto resultante de una deformación de la transparencia

transparencia, el tamaño de ésta aumentaba ligeramente con respecto al de la hoja.

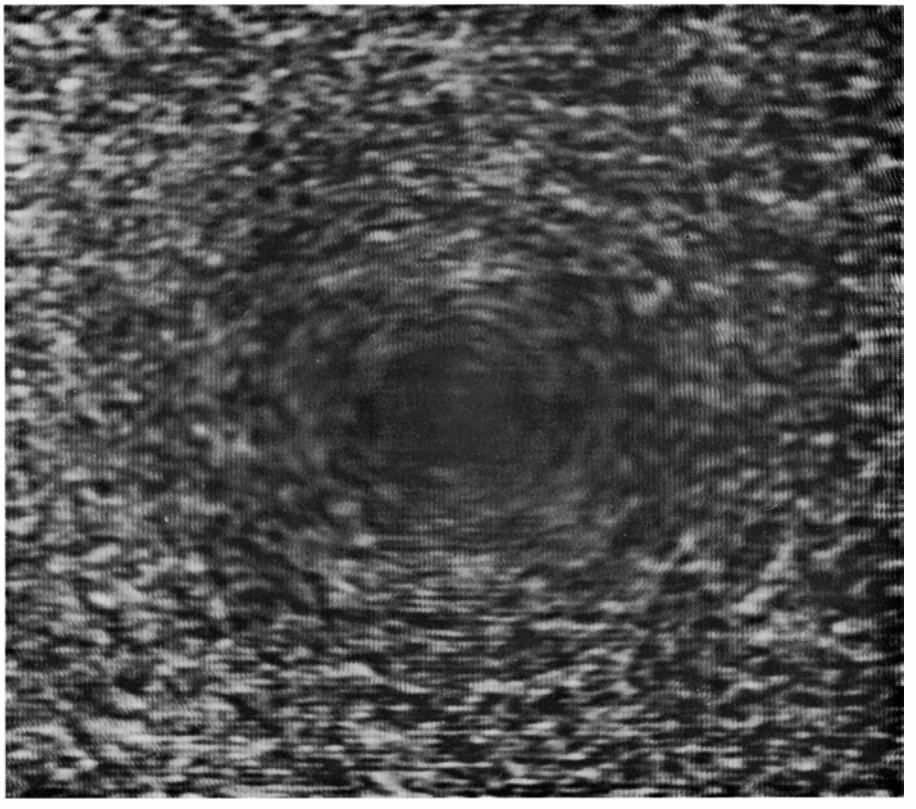
También se puede obtener la ilusión de una explosión manteniendo un espejo cerca de la transparencia y mirando luego, a la vez, la transparencia y su imagen especular con un mismo ojo. Si quiere recrear otra variedad de círculos, espirales y explosiones, alabee la transparencia cuando repose sobre la fotocopia. Si una vez alineada la transparencia con la fotocopia distorsionó la primera haciendo que forme una especie de colina hacia el centro de la página, en el extremo inferior se verán círculos, en el centro de ella espirales o explosiones y, en la parte superior, círculos mayores todavía.

Aparte de los experimentos con las rotaciones de las composiciones de puntos desparramados al azar, quizás el lector pretenda poner a prueba su habilidad artística en modelos geométricos de los que provocan efectos ópticos. Si se construye un modelo relativamente grande de puntos al azar y se distorsiona la transparencia de forma adecuada, puede conseguirse una ilusión óptica que vaya cambiando de acuerdo con la perspectiva. Los círculos y espirales variarán conforme uno se mueva delante del cuadro. Es probable que alguien haya hecho sus pinitos sobre esto en el "op-art", pero no sabría decir quién.

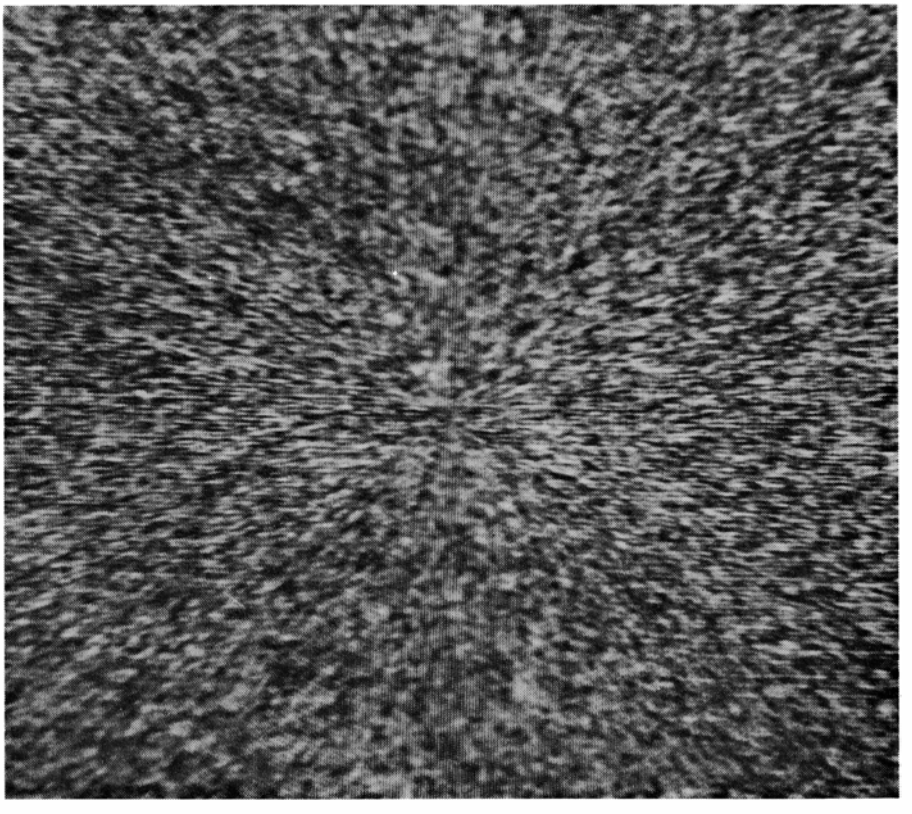
Aparece una composición de puntos aleatorios, distintos de las anteriores, al encender el televisor y sintonizar con un canal que no esté emitiendo señal. La pantalla se llena de "nieve" aleatoria captada por la antena. No se trata de un cuadro de puntos al azar, sino de una fluctuación aleatoria de intensidad de luz. Aunque es la intensidad de toda la pantalla la que fluctúa, las modificaciones en cualquier área pequeña de ella tienen un contraste mucho mayor que las fluctuaciones de toda la pantalla. Se da así la impresión de un conjunto de puntos blancos que se precipitan sobre la pantalla.

En 1961 MacKay describió varias ilusiones curiosas que podían verse en la nieve de la televisión. Si se mira con fijeza la pantalla, hallaremos que en el centro de su campo visual la nevada es más intensa que fuera del mismo. El efecto crece si se mira con un solo ojo. MacKay observó que esta región de agitación intensificada estaba relacionada con el área foveal del campo de la visión. La fóvea es la región de la retina que tiene la visión más aguda por albergar una mayor densidad de fotorreceptores.

MacKay señaló también que, contrariamente a lo que uno podría pensar, una pantalla de televisión vista con un solo ojo aparece más brillante y con mayor densidad de nieve que si se contempla con ambos ojos. Por otro lado, mirando con los dos ojos, las manchas sobre la pantalla parecen ser más persistentes y su movimiento ofrecer una característica más viscosa. Si se reduce la intensidad de la pantalla, su apariencia se uniformiza, se mire con uno o con ambos ojos. A bajas intensidades, la pantalla parece recibir sólo pequeñas motas de luz y gran parte del movimiento frenético desaparece.



Círculos sobre la nieve de la pantalla al superponer un modelo moiré n.º 4



"Agujero de emisión" en la nieve de la pantalla creada por el modelo n.º 5

Si mantenemos, frente a la pantalla, un dedo, un aro de alambre, un círculo negro o cualquier otro objeto similar, las motas parecen adherirse al mismo, creando la ilusión de una capa frontera en su entorno. Hasta podemos crear la ilusión de una corriente fluida si acertamos a elegir un objeto de configuración idónea. Si un arco negro se mueve cerca de la pantalla, las manchas parecerán moverse con él, como si estuvieran enlazadas al mismo. Un dedo en movimiento daría la impresión de ser perseguido por un enjambre de partículas.

En 1957, MacKay había demostrado que una rejilla situada sobre la pantalla del televisor podía ayudar al observador a organizar el remolino visual y convertirlo en una figura hasta cierto punto coherente. Situó una figura de líneas radiales sobre la pantalla; las manchas blancas de la pantalla parecían moverse perpendicularmente a las líneas, por lo que semejaban remolinos cuyo centro coincidía con el de la rejilla. El remolino podía producirse en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario. A veces, las áreas de la imagen parecían girar en sentido opuesto. Si MacKay giraba la rejilla, la imagen de la nieve semejaba girar en sentido contrario. Cuando colocó una rejilla de círculos concéntricos sobre la pantalla, los puntos de nuevo daban la impresión de moverse en unas corrientes perpendiculares a las líneas, pero esta vez fluían radialmente hacia fuera a partir del centro de la figura de la rejilla. La figura de la nieve también giraba lentamente alrededor del centro de la rejilla. En sus últimos experimentos, MacKay llegó a la observación de que, colocando un redondel sobre la pantalla, daba la sensación de que la nieve se amontonaba lentamente en el centro del mismo.

Repetí experimentos similares sobre la pantalla de mi propio televisor con un juego de transparencias moiré. En el paquete de transparencias los mejores efectos se conseguían con los modelos número 4 y número 5 al situarlos frente al televisor. El número 4 consistía en un pequeño círculo central rodeado por líneas radiales; el número 5 consistía en varios círculos concéntricos muy próximos entre sí.

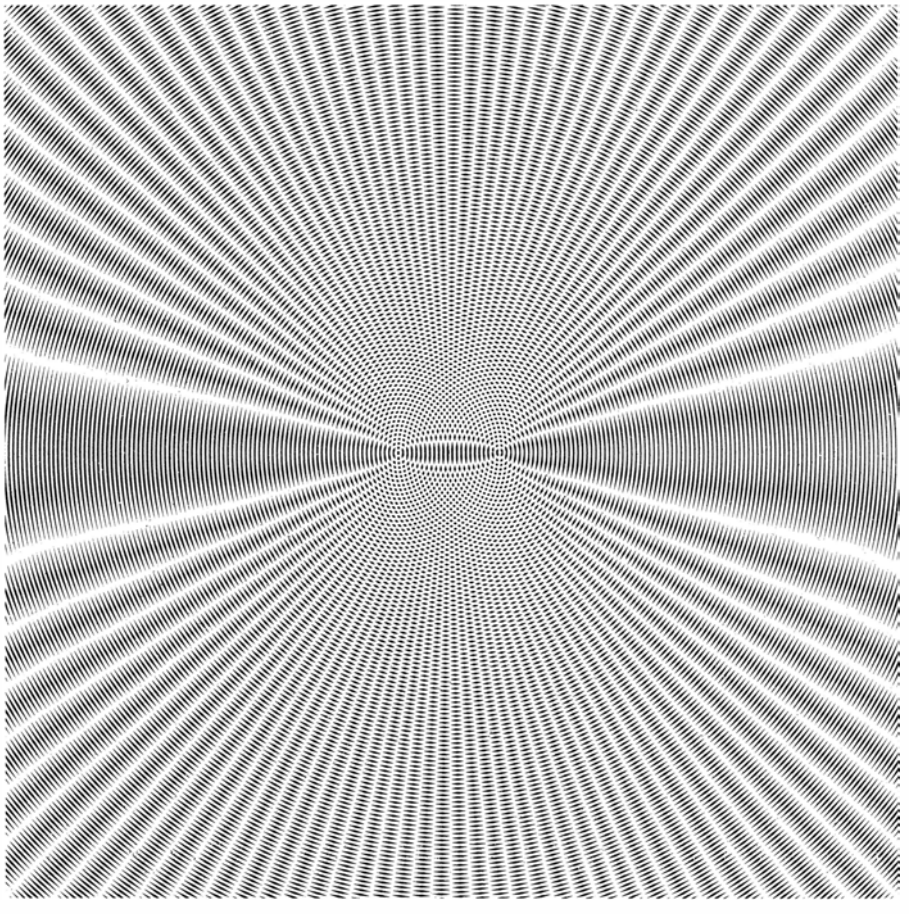
Cuando mantuve el número 4 sobre la pantalla, el centro del modelo aumentaba la frenética actividad de la nieve que giraba en espiral, en el sentido de las agujas del reloj o en sentido antihorario. Podía cambiar el sentido de giro aparente a voluntad. Para reforzar el efecto ajustaba los mandos de brillo y del contraste del aparato. Conseguía mejores resultados si quitaba el brillo totalmente y el mando del contraste lo ponía en la mitad. (Debo llamar la atención de que sólo la experimentación es la que puede determinar cuáles son las mejores condiciones de trabajo.) Los puntos blancos parecen salir de una superficie ligeramente curvada situada justo detrás del plano del cristal de la pantalla. Se presentaron las diferentes características del efecto, se mirase el aparato con uno o con ambos ojos.

Mantuve la transparencia ante un ojo, cerrando el otro; la ilusión cobraba entonces especial viveza, sobre todo si conseguía invertir el flujo o establecer simultáneamente un contraflujo. El flujo cerca del borde de la pantalla manifestaba menos actividad. Si bajaba la intensidad hasta que la pantalla se tornara prácticamente negra, el conjunto de puntos decrecía hasta semejar pequeños insectos que revoloteaban precipitadamente en torno a la rejilla.

El modelo número 5 organizó la nieve en pulsaciones, como si el centro del modelo fuera la fuente o el sumidero de las líneas radiales. Este efecto de "agujero emisor" se intensificaba notablemente cuando mantenía la transparencia cerca del ojo. La organización desaparecía de nuevo al bajar la intensidad de luz de la pantalla. Cuando elevaba la intensidad al máximo, recibía la impresión de que avanzaba un flujo de olas por la pantalla; se diría que las olas las produjera una piedra en su caída sobre una superficie de agua.

Desplazando ligeramente una transparencia del número 4 con respecto a una copia de la misma fija, se crean dos áreas de remolinos. Con dos copias del número 5 pude conseguir dos agujeros de emisión. Si alineaba las transparencias y luego desplazaba una, podía superponer los modelos moiré normales (que se distinguen cuando superponemos dos imágenes idénticas y luego desajustamos levemente una de ellas) sobre la organización de puntos en la pantalla. De mis transparencias, una tenía líneas negras y la otra, líneas rojas. El resultado de superponer las dos transparencias era que las líneas rojas se incorporaban a la corriente de nieve.

Nadie sabe con certeza qué proceso visual organiza la nieve cuando anteponemos al televisor determinados objetos. MacKay ha sugerido que la interacción de elementos sensibles al contorno del proceso visual podrían responsabilizarse quizá de la organización. Pero se desconoce el mecanismo. Tal vez los elemen-



Ilusión producida por ligera separación de dos modelos n.º 5 superpuestos

tos que en la cadena visual captan el sentido del contorno en las figuras superpuestas puedan ser insensibles al movimiento a lo largo de dichos contornos. Y así, el observador sólo vería el movimiento perpendicular al mismo. Por otro lado, parejas de elementos sensibles al contorno pueden realizar la sensibilidad del sistema visual al mencionado movimiento perpendicular. No se sabe cuál es la explicación correcta, pero en recientes trabajos hechos por MacKay, H. J. M. Gerrits y H. P. Stassen han demostrado que, si los modelos superpuestos se estabilizan en la retina, las figuras se debilitan y la ilusión de la organización de la nieve se diluye. (La estabilización de cualquier figura en la retina provoca la debilitación de su percepción.) Por esta razón es necesario percibir la figura para que se dé la ilusión o efecto óptico.

En 1974 R. I. MacDonald, de la Universidad de Carleton en Ottawa, describió una observación sobre la organización de la nieve del televisor en la línea de las explicaciones dadas por MacKay. MacDonald refería que cuando miraba a la nieve, primero con los dos ojos y luego con uno solo, aquella parecía moverse lentamente y las manchas hacerse más pequeñas. Consiguió el mismo efecto con una especie de nieve generada por un haz láser transmitido a través de un par de láminas de vidrio esmerilado. Conforme una de las láminas se movía alrededor de la luz procedente de la otra lámina, la luz se proyectaba sobre una pantalla.

MacDonald comprobó también si el efecto dependía de la correlación entre los dos ojos cuando ambos entraban en acción. Supongamos un observador que contemple la pantalla a través de dos tubos de cartón, orientados de manera que cada ojo vea una sección diferente de la pantalla. Cierra luego uno de los ojos. El efecto vuelve a presentarse, lo que implica que no depende de la correlación entre ambos ojos cuando se observa binocularmente la pantalla. El lector puede comprobar el resultado mirando la nieve de la pantalla de su televisor por medio de tubos de cartón.

A modo de último experimento, traté de desenfocar mis ojos mientras miraba la nieve de mi televisor. Al presionar suavemente la parte inferior de mi ojo, la nieve de la pantalla se hizo significativamente más vigorosoa y parecía fluir hacia arriba y hacia abajo. Me imagino que la presión alteró la forma de mi ojo y por lo tanto impidió un enfoque adecuado de la imagen de la pantalla sobre la retina. ¿Por qué este desenfoque incrementa la intensidad? No lo sé.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

GUERRA QUIMICA: REARME O DESARME

CHEMICAL WARFARE: A STUDY IN RESTRAINTS. Frederic J. Brown. Princeton University Press, 1968.

CHEMICAL AND BIOLOGICAL WEAPONS. Matthew S. Meselson en *Scientific American*, vol. 222, n.º 5, págs. 15-25; mayo, 1970.

THE PROBLEM OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL WARFARE. Stockholm International Peace Research Institute. Humanities Press, 1971-1975.

CHEMICAL WEAPONS AND CHEMICAL ARMS CONTROL. Dirigido por Matthew Meselson. Carnegie Endowment for International Peace, 1978.

POLITICAL ISSUES. VOL. 6, NO. 2: CHEMICAL/BIOLOGICAL WARFARE, A SELECTED BIBLIOGRAPHY. Center for the Study of Armament and Disarmament, California State University, 1979.

EXCITACIONES EN SUPERFICIES SOLIDAS

PRINCIPLES OF SURFACE CHEMISTRY. G. A. Somorjai. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1972.

INTERACTIONS ON METAL SURFACES. Dirigido por R. Gomer. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, New York, 1975.

INTRODUCTION TO THE THEORY OF SOLID SURFACES. F. García Moliner y F. Flores. Cambridge University Press, 1979.

MUERTE SUBITA DEL NIÑO

PROCEEDINGS OF THE FRANCIS E. CAMPS INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUDDEN AND UNEXPECTED DEATHS IN INFANCY. Dirigido por Robert R. Robinson. Canadian Foundation for the Study of Infant Deaths, Toronto, 1974.

SUDDEN UNEXPLAINED INFANT DEATH, 1970 THROUGH 1975: AN EVOLUTION IN UNDERSTANDING. Marie Valdes-Dapena en *Pathology Annual*, vol. 12, parte 1, págs. 117-145; 1977.

SUDDEN INFANT DEATH SYNDROME (CRIB DEATH). Warren G. Guntheroth en *American Heart Journal*, vol. 93, n.º 6, págs. 784-793; junio, 1977.

PROTEINAS UTILES OBTENIDAS A PARTIR DE BACTERIAS RECOMBINANTES

A BACTERIAL CLONE SYNTHESIZING PROINSULIN. Lydia Villa-Komaroff, Argiris Efstradiadis, Stephanie Broome, Peter Lomedico, Richard Tizard, Stephen P. Naber, William L. Chick y Walter Gilbert en *Proceedings of the Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 75, n.º 8, págs. 3727-3731; agosto, 1978.

SYNTHESIS IN *E. COLI* OF A POLYPEPTIDE WITH HUMAN LEUKOCYTE INTERFERON ACTIVITY. Shigekazu Nagata, Hideharu Taira, Alan Hall, Lorraine Johnsrud, Michel Streuli, Josef Escödi, Werner Boll, Kari Cantell y Charles Weissmann en *Nature*, en prensa.

THE SYNTHESIS OF EUKARYOTIC PROTEINS IN PROKARYOTIC CELLS. Lydia Villa-Komaroff en *Gene Structure and Expression*, dirigido por D. H. Dean, L. F. Johnson, P. C. Kimball y P. S. Perlman. Ohio State Press, en prensa.

VIDRIOS METALICOS

METALLIC GLASSES. John J. Gilman en *Physics Today*, vol. 28, n.º 5. págs. 46-53; mayo, 1975.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF METALLIC GLASSES. P. Chaudhari y D. Turnbull en *Science*, vol. 199, n.º 4324, págs. 11-21; 6 de enero de 1978.

ESTRUCTURA DEL UNIVERSO PRIMITIVO

MODERN COSMOLOGY. D. W. Sciama. Cambridge University Press, 1971.

PHYSICAL COSMOLOGY. P. J. E. Peebles. Princeton University Press, 1971.

THE FIRST THREE MINUTES: A MODERN VIEW OF THE ORIGIN OF THE UNIVERSE. Steven Weinberg. Basic Books, 1977. (Traducción española de Alianza Editorial.)

PARTICLE PHYSICS AND COSMOLOGY. David N. Schramm y Michael S. Turner en *Physics Today*, vol. 32, n.º 9, págs. 42-48; septiembre, 1979.

THE BIG BANG. Joseph Silk. W. H. Freeman and Company, 1980.

ECOLOGIA SOCIAL DE LOS COYOTES

FEEDING AND SOCIAL BEHAVIOR OF THE STRIPED HYENA (*HYAENA VULGARIS*). H. KRUUK en *East African Wildlife Journal*, vol. 14, págs. 91-111; 1976.

BEHAVIORAL ECOLOGY. Dirigido por J. R. Krebs y N. B. Davies. Sinauer Associates, Inc., 1978.

THE CLEVER COYOTE. Stanley P. Young y Hartley y H.T. Jackson. University of Nebraska Press, 1978.

COYOTES: BIOLOGY, BEHAVIOR, AND MANAGEMENT. Dirigido por Marc Bekoff. Academic Press, 1978.

THE RELATIONSHIP BETWEEN FOOD COMPETITION AND FORAGING SIZE GROUP IN SOME LARGER CARNIVORES. J. Lamprecht en *Zeitschrift für Tierpsychologie*, vol. 46, págs. 337-343; 1978.

TRANSPORTE DE SUSTANCIAS EN LAS CELULAS NERVIOSAS

AXOPLASMIC TRANSPORT (WITH PARTICULAR RESPECT TO ADRENERGIC NEURONS). Annica Dahlström en *Philophical Transactions of the Royal Society of London*, serie B, vol. 261, págs. 325-358; 1971.

AXONAL TRANSPORT: THE INTRACELLULAR TRAFFIC OF THE NEURON. Bernice Grafstein en *Handbook of Physiology*, dirigido por Eric R. Kandel. American Physiological Society, 1977.

AXONAL TRANSPORT: COMPONENTS, MECHANISMS AND SPECIFICITY. James H. Schwartz en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 2, págs. 467-504; 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

A BOOK OF CURVES. Edward H. Lockwood. Cambridge University Press, 1961.

MAXWELL'S OVALS AND THE REFRACTION OF LIGHT. Milton H. Sussman en *American Journal of Physics*, vol. 34, n.º 5, págs. 416-418; mayo, 1966.

TALLER Y LABORATORIO

MOIRÉ EFFECT FROM RANDOM DOTS. Leon Glass en *Nature*, vol. 223, n.º 5206, págs. 578-580; 9 de agosto de 1969.

PERCEPTION OF RANDOM DOT INTERFERENCE PATTERNS. Leon Glass y Rafael Pérez en *Nature*, vol. 246, n.º 5432, págs. 360-362; 7 de diciembre de 1973.

KINETIC CYCLOPEAN EFFECT. R. I. MacDonald en *Nature*, vol. 249, n.º 5453, pág. 192; 10 de mayo de 1974.

Taller y laboratorio

Fantasías en la nieve: más pasatiempos con el punteado caótico de las pantallas de televisión

Jearl Walker

El mes pasado les describí las ilusiones ópticas que pueden experimentarse al contemplar el punteado caótico, o "nieve", que se forma en la pantalla de un televisor cuando el aparato se sintoniza con un canal que no está emitiendo. De alguna manera, nuestro sistema visual organiza estas imágenes aleatorias en movimientos y figuras coherentes. Cómo lo hace es algo que no se conoce muy bien.

Hay otro tipo de organización del ruido caótico de las pantallas de televisión que se ha investigado durante los últimos años y que se conoce mejor. Al contemplar el ruido visual con un ojo cubierto por un filtro oscuro, pero no opaco, la nieve puede separarse en dos capas que se mueven en sentidos contrarios y aparentan encontrarse a distintas profundidades. Una de las capas parece como hundida en la pantalla, con la nieve moviéndose desde el ojo tapado hacia el descubierto. La otra capa sobresale de la pantalla y la nieve se desplaza en sentido contrario. La velocidad media a través de nuestro campo visual es de cinco a diez grados por segundo. Hay observadores que tienen dificultades para percibir la ilusión y otros muchos detectan más de dos capas.

Este efecto lo han clasificado algunos investigadores dentro de la categoría general de ilusión de Pulfrich, de la que traté en esta sección en mayo de 1978. La forma habitual de presentar la ilusión de Pulfrich consiste en hacer oscilar un péndulo dentro del campo visual del observador, uno de cuyos ojos está cubierto por un filtro opaco, mientras que el otro ojo se deja descubierto. En estas condiciones el péndulo aparenta oscilar describiendo no una línea recta, sino una elipse. Según la mayoría de las hipótesis acerca de la ilusión de Pulfrich, el filtro oscuro hace que la retina del ojo cubierto se retrase en la percepción de la señal visual; resultado de ello, el ojo descubierto ve el objeto que se mueve en su posición verdadera, mientras que el ojo tapado lo ve en la posición que ocupaba un momento antes. Entonces, el observador interpreta la escena considerando que el objeto se encuentra más próximo o más lejano a él de lo que está en realidad. Si el objeto se mueve desde el ojo cubierto hacia el descubierto, la convergencia mental de los rayos aparentes lo situará más lejos del observador de lo que está; si el movimiento se efectúa en el sentido opuesto, el objeto parecerá encontrarse más próximo.

La nieve de las pantallas de televisión no es en realidad un objeto en movimiento, pero manifiestamente puede resultar el mismo tipo de ilusión si se contempla la pantalla con un ojo cubierto por un filtro oscuro. Los primeros en estudiar este efecto fueron Christopher W. Tyler, del Instituto Smith-Kittlewell de Ciencias de la Visión, y John Ross, de la Universidad de Australia Occidental. Investigaciones recientes de Joseph J. Mezrich y Albert Rose, de Exxon Corporate Research Laboratories, en Linden, New Jersey, han aclarado más aspectos del mismo. No obstante todo ello, y al igual que ocurre con la mayoría de las demás ilusiones ópticas, seguimos sin saber muchos pormenores de ese efecto.

Supongamos que en la pantalla aparece un parásito. De acuerdo con una hipótesis vigente, si es el ojo izquierdo el que está cubierto por el filtro, el derecho percibirá el punto inmediatamente y el ojo izquierdo lo percibirá un instante después. Ahora supongamos que, en ese mismo momento, aparece un segundo punto desplazado ligeramente a la derecha del lugar que en un principio ocupaba el primero, que ya se desvaneció de la pantalla. Este segundo punto lo ve al instante el ojo derecho, mientras que el izquierdo está justamente entonces viendo el primero. En la realidad, esta situación la interpreta el sistema visual del observador haciendo que converjan los rayos luminosos procedentes de ambos puntos, por lo que en la pantalla parece haber un único punto hundido en ella. Lo mismo ocurriría si apareciese un tercer punto cuando el segundo se desvaneciese de la pantalla. Si la secuencia de puntos es adecuada, éstos aparentarán moverse hacia la derecha como un punto único hundido en la pantalla y la ilusión se repetirá una y otra vez. Aun cuando la configuración de puntos sea en realidad aleatoria, una secuencia adecuada dará la ilusión de un plano de puntos móviles hundido en la pantalla.

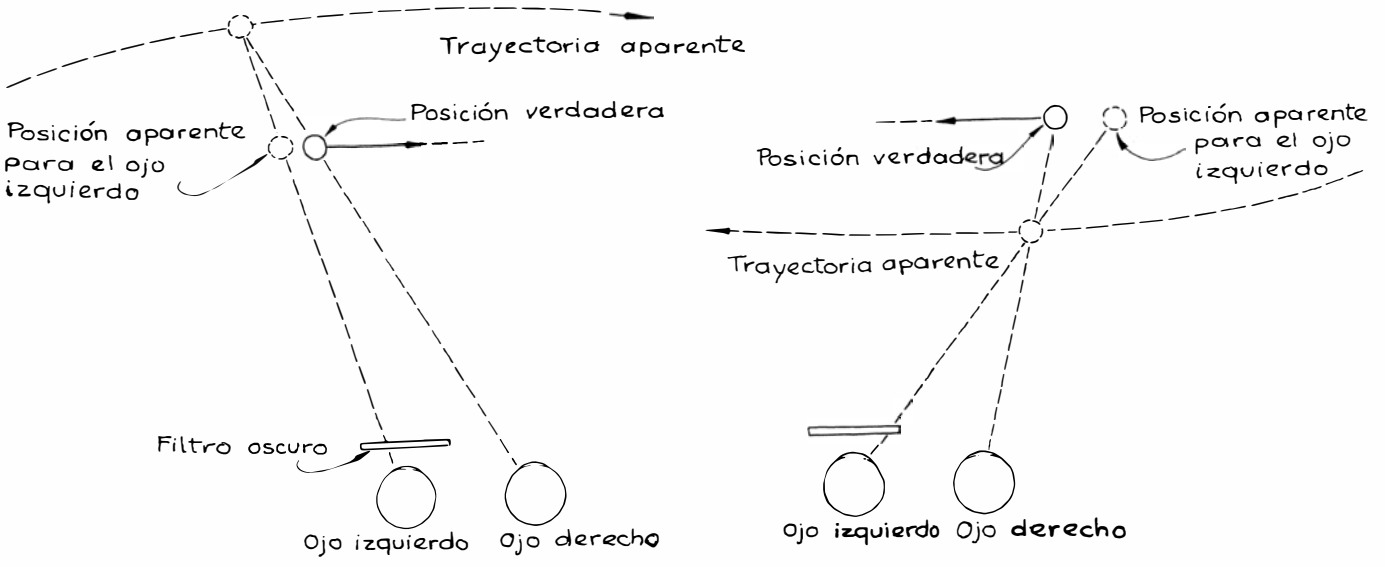
Podemos ver, de una manera parecida, los puntos como sobresaliendo de la pantalla y moviéndose hacia la izquierda si su secuencia es tal que cada uno aparezca ligeramente a la izquierda del precedente. El retraso perceptivo de uno de los ojos produce confusión, salvo que el observador crea que los rayos luminosos que le llegan de ambos puntos proceden de un solo punto ligeramente separado de la pantalla. De aquí que el ruido caótico de los puntos blancos de la pantalla se organice en planos que parecen encontrarse a profundidades diferentes y moverse en sentidos opuestos. Si el observador traslada el filtro al otro ojo, se invertirán los sentidos de los movimientos de los planos.

Profundidad y movimiento aparentes en la "nieve" de la televisión

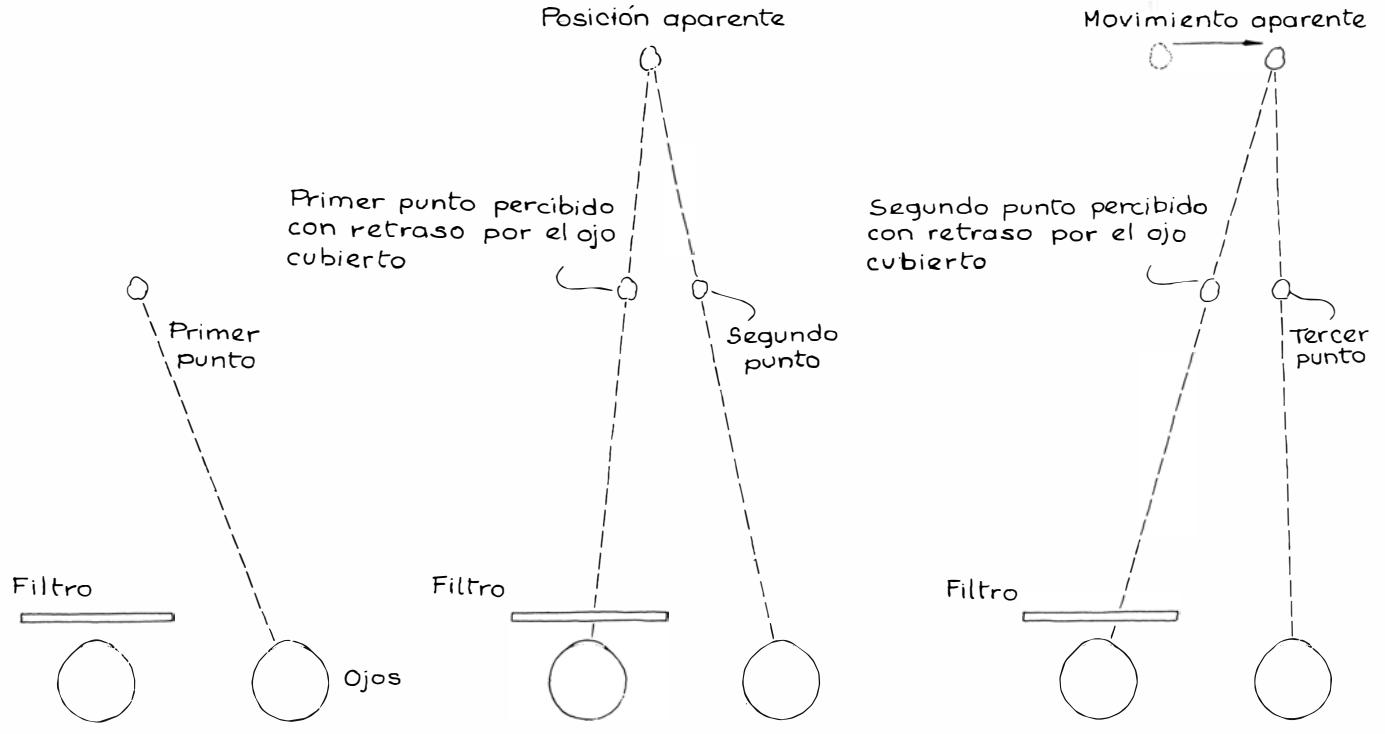
Mezrich y Rose han descubierto algunas características curiosas del movimiento aparente del ruido caótico. Al hacer variar en la pantalla la densidad de puntos parásitos, observaron que la velocidad aparente de los puntos en su movimiento a través de la pantalla resultaba afectada muy poco; sin embargo, por debajo de cierto umbral de densidad de puntos el efecto desaparecía. Para densidades algo superiores a la umbral sólo observaron un plano de puntos móviles hundido en la pantalla. Para ver los dos planos, los puntos debían hallarse en una densidad como la que se encuentra al sintonizar el televisor con un canal inactivo. (A veces, el aparato puede necesitar un ajuste normal de los mandos.) El hecho de que la velocidad aparente de los puntos fuese independiente de su densidad, con tal que ésta fuese superior a la umbral, proporcionó a Mezrich y Rose una de las claves para explicar la ilusión.

Además, la ilusión resultó depender del ángulo subtendido por la pantalla dentro del campo visual del observador. Cuando este ángulo disminuía a partir de un valor inicial elevado, aumentaba la densidad umbral de puntos. Todo parecía que, a medida que la imagen de parásitos se iba limitando progresivamente al centro de la fóvea (que es la depresión de la retina donde con mayor densidad se agrupan los fotorreceptores), se necesitaban mayores densidades de parásitos para proporcionar la ilusión de profundidad. Al reducir el ángulo de 30 minutos a 15, la densidad umbral de puntos necesaria para la ilusión saltó a un valor mucho más elevado. Al reducir aún más el ángulo, la ilusión desaparecía. Estos inesperados resultados proporcionaron otro indicio de mayor importancia acerca de la naturaleza de la ilusión.

¿Cómo se compaginan ambos indicios? La velocidad aparente de los pun-



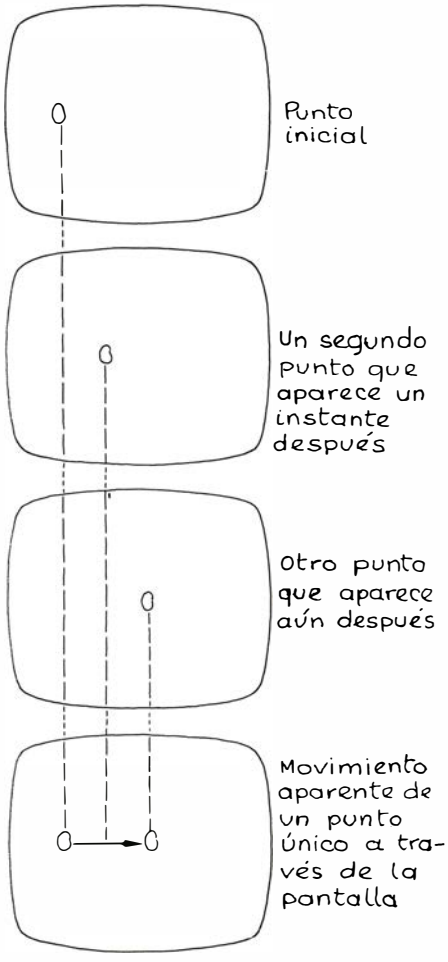
Ilusión de Pulfrich con un péndulo en oscilación



Ilusión de Pulfrich con el punteado de una pantalla de televisión

tos la fija el cociente de un ángulo característico (que el observador determina de alguna forma) dividido por un tiempo característico de gran interés para la observación. Es probable que este tiempo característico sea el tiempo que dura una fluctuación de intensidad en la pantalla, 1/60 de segundo. (En Estados Unidos la frecuencia de la red es de 60 cps; en otros países este tiempo característico será de 1/50 seg.) El ángulo característico ya no es tan fácil de adivinar, y habrá que considerar aquí dos factores.

El origen de uno de los factores se encuentra en las investigaciones realizadas acerca de la estereopsis en imágenes de punteado aleatorio. Habitualmente, en este tipo de experiencias el observador ve dos figuras simultáneamente, una con cada ojo. Cualquiera de las dos figuras contemplada por separado parece presentar una distribución de puntos puramente aleatoria, pero cuando ambas se miran a la vez y se fusionan, el observador percibe profundidad y estructura. Los experimentadores han encontrado que, para que se dé la sensación de profundidad, es necesario que los centros de la zona saliente y de la zona hundida estén separados un ángulo de ocho minutos como mínimo. Por consiguiente, las figuras fundidas mentalmente deben ocupar un ángulo de 15 minutos como mínimo en el campo visual del observador.



Efecto cascada

He aquí, pues, una cifra relacionada con el valor inferior del ángulo que debe ocupar una pantalla de televisión en el campo visual de un observador si se desea que los parásitos se organicen en planos situados a distintas profundidades. Como mínimo, la pantalla debe ocupar un ángulo de 15 minutos. Si ocupa más de 30 minutos, el observador podrá organizar los parásitos con bastante facilidad. Si ocupa entre 15 y 30 minutos, la organización será más difícil. Por eso, el umbral de la densidad de puntos ha de ser mayor a fin de asegurar la presencia de puntos en cantidad suficiente para conseguir zonas de hundimiento y de resalto separadas un ángulo de ocho minutos como mínimo.

Otro aspecto a considerar es que los puntos aparentan moverse suave y lentamente, cuando la realidad es que no se mueven en absoluto. ¿Por qué el observador percibe movimiento cuando lo único que ocurre en la pantalla es que fluctúa la intensidad luminosa? Ya hay investigaciones anteriores acerca de la ilusión de movimiento que se crea cuando los estímulos son consecutivos y están ligeramente separados. Esta ilusión la hemos experimentado todos cuando se hacen parpadear una tras otra las luces de una hilera, de forma que se tiene la impresión de que toda la hilera se mueve. Es el efecto que se observa en los reclamos exteriores de teatros y moteles.

Para que dos puntos consecutivos de una pantalla de televisión puedan percibirse como un único punto brillante que se mueve suavemente, los puntos han de estar separados un ángulo no superior a unos 15 minutos. Este movimiento suave, conocido por cascada o "movimiento fi", sólo puede verse cuando el flujo en un sentido es distinguible del flujo en el otro sentido. En ausencia de este discernimiento, el observador será incapaz de separar las fluctuaciones caóticas y percibir el efecto cascada. Con un filtro oscuro sobre un ojo se provoca tal discernimiento entre los sentidos del flujo en cascada, ya que aquél fuerza a los dos movimientos aparentes a separarse en dos planos situados a distintas profundidades.

Por tanto, la velocidad de los movimientos está determinada por las limitaciones angulares impuestas por la ilusión de cascada y la ilusión de profundidad; la velocidad está también regida por el tiempo mínimo de duración de las fluctuaciones. Las limitaciones angulares imponen que los puntos consecutivos estén separados un ángulo no superior a 15 minutos. La ilusión de profundidad impone que las zonas contiguas de resalto y hundimiento estén separadas un ángulo de ocho minutos como mínimo. Por eso, cuando un punto hundido y otro resaltado se cruzan entre sí, su separación inicial debe ser al menos de ocho minutos y, al cabo de 1/60 de segundo, su separación debe ser de ocho minutos como mínimo, e inferior a 15. Si dividimos este ángulo comprendido entre ocho minutos y 15 por el tiempo de 1/60 de segundo, resulta para los puntos una velocidad aparente que se sitúa entre ocho y 15 grados por segundo, lo que concuerda con las mediciones de Mezrich y Rose.

Investigaciones recientes de David S. Falk, de la Universidad de Maryland, y Robert Williams, de la Universidad de Bristol, sugieren que los puntos se organizan ulteriormente aún más después de haber sido asignados a uno de los planos. El observador empieza viendo que los puntos aparecen caóticamente en la pantalla del televisor. La visión monocular asigna velocidades a los movimientos de los puntos en cascada hacia la derecha y hacia la izquierda. La visión binocular, estando la respuesta de uno de los ojos retrasada por un filtro, asigna profundidad a los puntos de acuerdo con la ilusión de Pulfrich. En este punto, la velocidad y la profundidad deben mostrar todo un intervalo de valores.

Falk y Williams han sugerido que el observador organiza adicionalmente los puntos comparando las velocidades de diferentes grupos de éstos. Así, las manchas cuyas velocidades aparentes son pequeñas y que se encuentran relativamente separadas dan la impresión de moverse más despacio que el ruido de la pantalla. Por el contrario, las manchas cuyas velocidades aparentes son mayores y que se encuentran relativamente cercanas entre sí dan la impresión de moverse a mayor velocidad que el ruido de la pantalla. Por ello, Falk y Williams sostienen que el procesado visual que sigue a la asignación estereoscópica de la profundidad es responsable de la conformación del espectro de velocidades y profundidades bajo la forma de la ilusión de puntos situados en un solo plano, moviéndose todos ellos a una velocidad aproximadamente constante y uniforme. Hay uno de estos planos moviéndose en cada sentido derecho e izquierdo.

Un modelo alternativo al de Pulfrich es el de la "disparidad espacial aleatoria". Según esta hipótesis, los puntos se eligen por parejas al azar y los puntos de cada pareja se fusionan en uno solo, al que se asigna profundidad. La profundi-

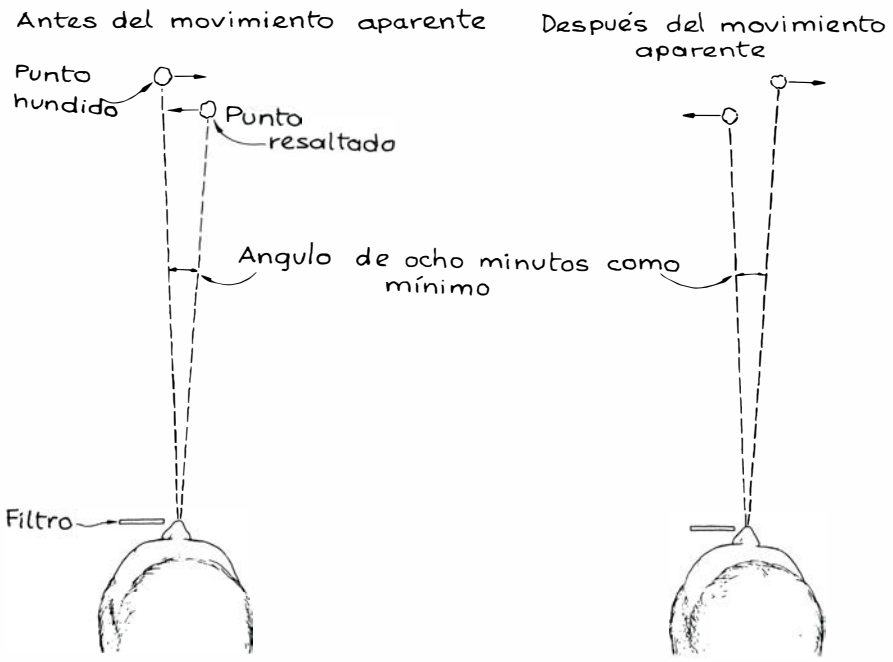
dad mayor se asigna a las parejas de puntos que estén separados unos 15 minutos. A continuación, y sólo entonces, se asigna movimiento. Si la imagen de la pantalla fluctúa en 1/60 de segundo, la velocidad aparente de los puntos será de 15 grados por segundo. Nuevas experiencias determinarán si esta hipótesis explica la ilusión mejor que el modelo de Pulfrich u otro cualquiera.

Yo mismo he repetido algunos experimentos de varios de los investigadores utilizando un par de filtros polarizadores cruzados que mantenía delante de un ojo mientras observaba la nieve de mi televisor en blanco y negro. Podía actuar sobre distintos factores. Así, podía modificar el brillo y el contraste de la pantalla y regular la transmisión a través de los filtros. Con ésta parcialmente permitida y los mandos de brillo y contraste cercanos a su posición normal, la ilusión de dos planos de puntos coherentes se hizo patente de inmediato. Influía poco o nada que suprimiese totalmente el brillo. La pantalla parecía entonces albergar una imagen plana de pulgones de agua resplandecientes deslizándose por el cristal, formando a veces, brevemente, figuras geométricas. Además, esta ilusión desaparecía cuando la transmisión a través de los filtros se reducía mucho, es decir, cuando los ejes de polarización de los filtros se encontraban casi perpendiculares. Por supuesto, sin los filtros la ilusión no se presentaba.

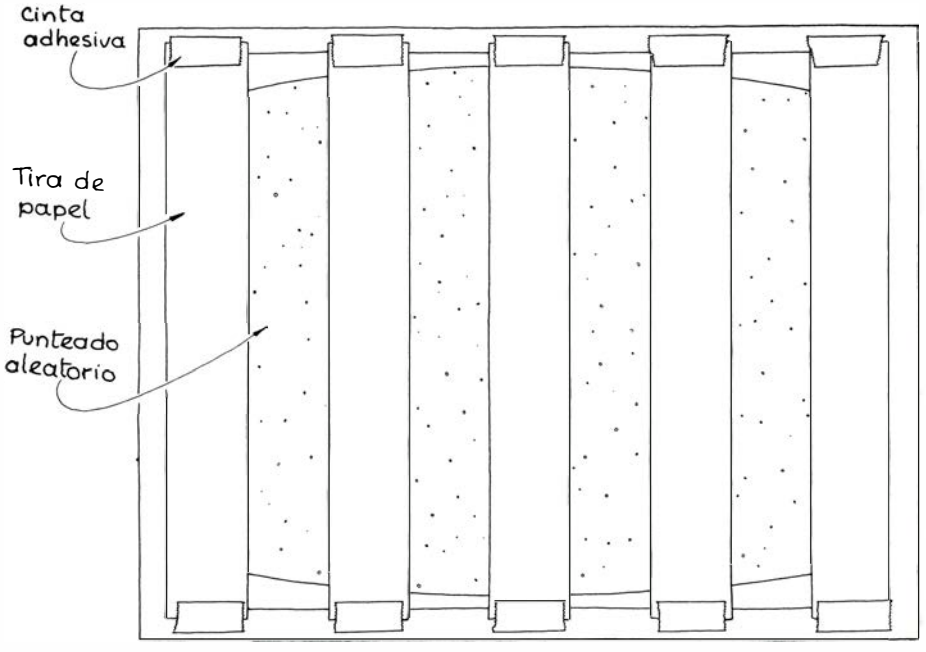
Observé una diferencia importante entre lo que vi y la ilusión descrita en los artículos publicados sobre el tema. Los puntos que yo observaba solían arremolinarse coherentemente; así, con los filtros delante del ojo izquierdo, el remolino se formaba a derechas, mientras que con los filtros delante del ojo derecho el remolino se formaba en sentido contrario. No acabo de comprender del todo el porqué de aquellos remolinos. Su aparición no dependía críticamente de los mandos del televisor y seguían apareciendo cuando sustituí los filtros polarizadores por celofán coloreado; de aquí que no dependan de la polarización de la luz.

Conjeturo que los remolinos son el resultado de mi propia organización del movimiento coherente, tras hacer una fusión estereoscópica de las pantallas captadas por ambos ojos. Este nivel de organización ulterior se encuentra dentro de las pautas que sugieren Falk y Williams. El efecto cascada visto monocularmente conduce a la ilusión de que los puntos se mueven. Y el mecanismo de la ilusión de Pulfrich me hizo asignar distancia a los puntos en movimiento. A continuación, interpreté además los puntos estrechando los límites de sus velocidades aparentes, pero organizando adicionalmente las manchas móviles en forma de remolino. Por ejemplo, con los filtros delante del ojo izquierdo, en la parte superior de la pantalla predominaban las manchas que se desplazaban hacia la derecha y en la parte inferior las que se desplazaban hacia la izquierda. El efecto resultante era que se veía un remolino que giraba en el sentido de las agujas del reloj. Esta ilusión era tan convincente que cuando me concentré en un solo plano de puntos, estos parecían arremolinarse también.

Observé otros dos efectos más. Con los filtros colocados cerré los ojos alternadamente de forma que viese la pantalla monocularmente y sin fusión estereoscópica. Con el ojo descubierto veía una distribución de puntos caótica, como cabía esperar y es normal ver en la nieve de la televisión cuando el observador la contempla binocularmente. Con el ojo cubierto veía una pantalla menos iluminada y, por tanto, no apreciaba ningún punteado aleatorio, sino ondas que avanzaban al azar mientras el punteado caótico se organizaba en cascadas. Este mismo tipo de cascada puede verse, si se contempla la pantalla sin filtros, cuando reducimos la intensidad.



Separación angular necesaria para la ilusión de profundidad



Cómo conseguir franjas de punteado caótico en la pantalla

El segundo efecto que observé es similar a uno que les describí el mes pasado. Al contemplar monocularmente una pantalla de nieve, el centro del campo visual parece bullir en un frenesí de actividad, mientras que la zona circundante está relativamente en calma. Utilizando los filtros, observé en la pantalla la misma zona hiperactiva mirando monocularmente tanto con el ojo cubierto como con el descubierto. Al mirar con ambos ojos a la vez y distinguir planos de puntos moviéndose hacia la derecha o hacia la izquierda, la zona hiperactiva desaparecía. Sin embargo, cuando los puntos se separaban en remolinos, parecían dar vueltas en la zona hiperactiva. Esta impresión la verifiqué pasando rápidamente de visión monocular (cerrando un ojo y acotando la zona hiperactiva) a binocular (con el arremolinamiento presente).

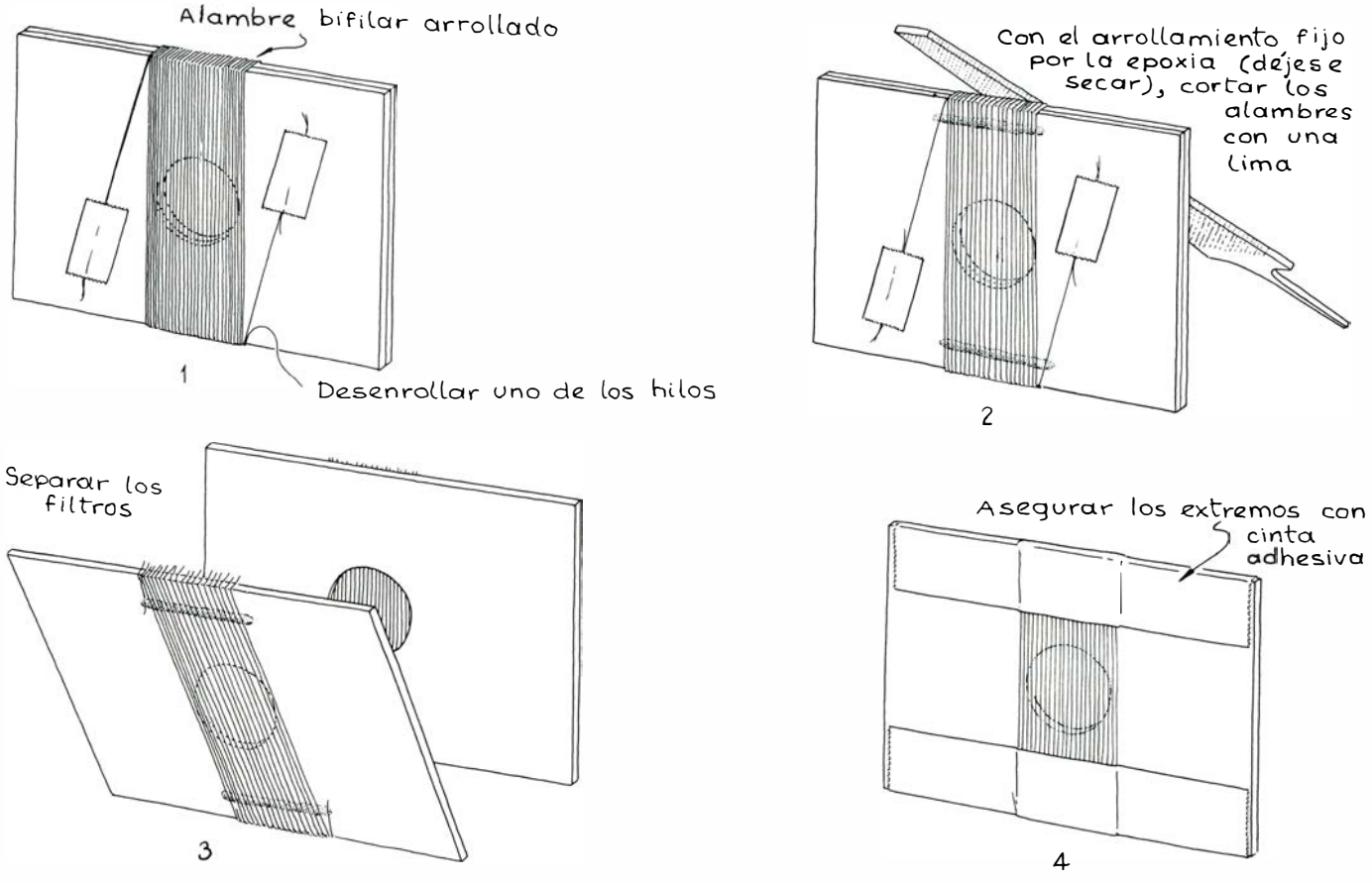
Mezrich y Rose han llevado a cabo otro experimento que yo he repetido en una versión ligeramente distinta. Dicho experimento consistió en separar el punteado caótico en franjas punteadas y franjas en blanco verticales. Tales franjas eran siempre de la misma anchura, y los experimentadores consiguieron ajustar su número. Cuando las franjas eran relativamente anchas, de forma que en la pantalla había pocas, la ilusión de puntos que se movían coherentemente en planos se desarrollaba independientemente en cada franja. Con franjas estrechas, y por tanto con mayor número de las mismas, el movimiento coherente podía verse a través de todas ellas.

La transición entre ambos efectos tenía lugar cuando la frecuencia de franjas se hallaba entre uno y dos ciclos por grado del campo visual. (Un ciclo se compone de una franja punteada y una franja en blanco.) Cuando la frecuencia de franjas era de un ciclo por grado, las manchas de puntos hundidos y salientes estaban suficientemente separadas para que pudiese verse la ilusión de profundidad de Pulfrich. (Recuérdese que la separación debe ser un ángulo de ocho minutos como mínimo.) A la frecuencia de un ciclo por grado, la anchura de una franja punteada es 30 minutos, por lo que las manchas pueden estar suficientemente separadas y el observador podrá ver la ilusión de profundidad y movimiento coherente dentro de la franja.

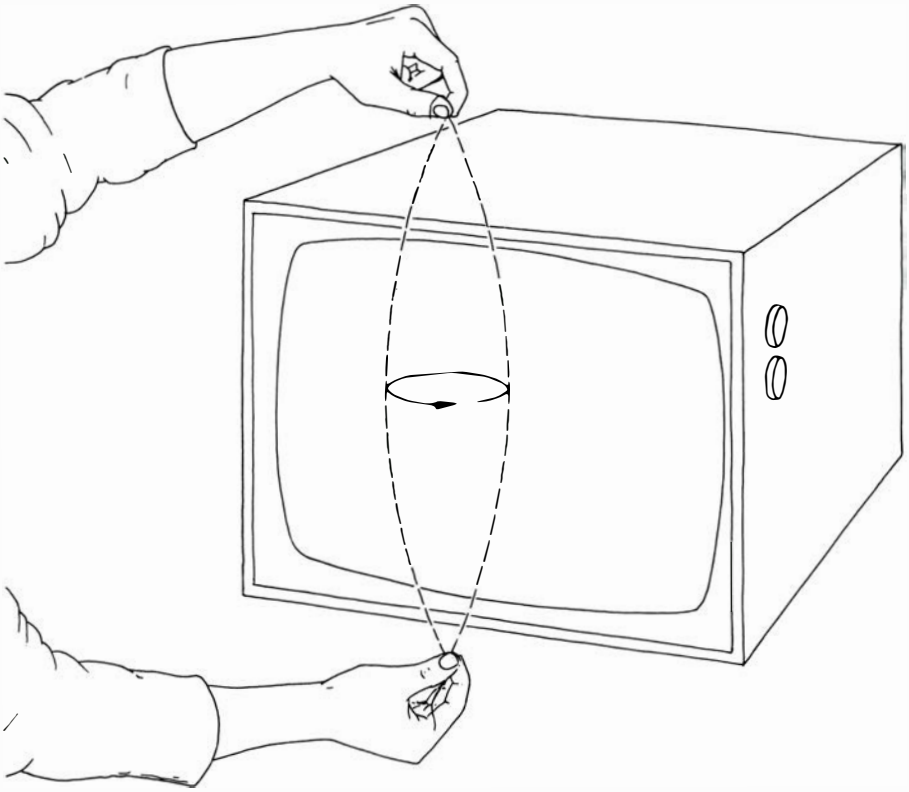
A la frecuencia de dos ciclos por grado, la anchura de las franjas punteadas es sólo 15 minutos. Es menos probable que las manchas muestren entonces la separación necesaria, por lo que la ilusión de profundidad y movimiento coherente resulta también menos probable. Por el contrario, las franjas punteadas estarán suficientemente próximas para que la separación necesaria se dé entre franjas contiguas y la ilusión de profundidad y de movimiento coherente aparecerá, pero se hará patente a través de todas las franjas antes que en cada una de ellas individualmente.

Estos mismos resultados los he podido conseguir pegando tiras de papel verticales a la pantalla de mi televisor. Si bien utilicé tiras de diferentes anchuras, en cada ensayo la anchura de las tiras fue siempre la misma e igual a la de las porciones de pantalla que dejé al descubierto. En todos los experimentos traté de colocar la cabeza exactamente en la misma posición que antes para que la pantalla ocupase siempre el mismo ángulo de visión. La transición de movimiento coherente en cada franja por separado a movimiento coherente a través de todas las franjas se presentaba aproximadamente a la misma frecuencia de franjas que encontraron Mezrich y Rose.

Dwight M. Brown, Jr., de Shreveport, Louisiana, me envió no hace mucho un conjunto de observaciones completamente diferentes realizadas sobre un televisor. Brown ha observado que, al mover un peine o una rejilla que sostenía delante del aparato, lograba a veces que la imagen de la pantalla pare-



Construcción de un filtro de Ronchi



Ilusiones producidas con una cuerda en rotación

ciera moverse. Esta ilusión podría resultar de un efecto muaré entre un espaciado periódico de la imagen y el espaciado periódico del peine o de la rejilla.

La rejilla utilizada por Brown es un filtro de Ronchi que construyó a partir de dos trozos de placa de aluminio delgada y un poco de alambre bifilar (de dos hilos) de 0,23 milímetros. Tras practicar un orificio de unos 3 centímetros en cada placa, arrolló el alambre alrededor. Con ello, ambos lados del orificio quedaron cubiertos de alambre. La parte de éste en contacto con el metal la fijó con epoxia y cortó el alambre con una lima para separar los dos trozos de metal. Seguidamente retiró un alambre sí y otro no y colocó cinta adhesiva sobre los extremos cortados del alambre restante.

Brown ha experimentado también con los efectos estroboscópicos asociados a las pantallas de televisión. Probablemente el lector ya habrá observado que un objeto que gire muy rápido delante de una pantalla en funcionamiento puede crear un efecto de este tipo. Observé hace años que una peonza plana que bailase delante de un receptor de televisión daba la impresión de mantenerse estacionaria, o incluso girar en sentido contrario al verdadero. En un televisor, la imagen la crea el haz de electrones que por el interior del tubo de imagen barre éste de izquierda a derecha, raya a raya, hasta alcanzar su base. Y ello explica que la intensidad de la pantalla fluctúe periódicamente.

Supongamos que delante de la pantalla se pone a bailar una peonza dotada de un dibujo a rayas en su superficie superior. Si gira en coincidencia con la variación de las fluctuaciones de intensidad de la pantalla, su superficie superior se iluminará cada vez que el dibujo tenga la misma orientación. Entonces, salvo que esta iluminación se difumine en la luz de la habitación, un observador verá constantemente el dibujo con la misma orientación y la peonza parecerá estacionaria. Si la rotación de la peonza es ligeramente más rápida que la cadencia a la que es iluminada por la pantalla, el dibujo parecerá girar lentamente en el mismo sentido que la peonza. Si la rotación de la peonza es ligeramente inferior a la cadencia de iluminación, el dibujo se iluminará cada vez bajo una orientación levemente anterior a la que tenía en la iluminación precedente y, en consecuencia, parecerá girar en sentido contrario al de la peonza.

Brown ha podido conseguir un efecto estroboscópico empleando el barrido lineal de la pantalla de una manera bastante más sencilla. Para ello, hizo balancear en círculo una cuerda por delante de la pantalla. Al mirar la pantalla a través de la cuerda, observó unas rayas oscuras que la cruzaban, mientras la cuerda saltaba de una posición a otra.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL HUMUS

SOIL ORGANIC MATTER: ITS NATURE, ITS ROLE IN SOIL FORMATION AND IN SOIL FERTILITY. Segunda edición. M. M. Kononova, Pergamon Press, Oxford, 1966.

SOIL BIOCHEMISTRY, IV vol. A. D. McLaren *et al.*: Marcel Dekker, Inc., New York, 1967-1975.

SOIL ORGANIC MATTER AND ITS ROLE IN CROP PRODUCTION. F. E. Allison. Elsevier Scient. Publ. Co.; Amsterdam, 1973.

MANUAL DE EDAFOLOGIA. Ph. Duchaufour. Toray-Masson; Barcelona, 1975.

SOIL ORGANIC MATTER . M. Schnitzer y S. U. Khan. Elsevier Scient. Publ. Co.; Amsterdam, 1978.

EL COMPUTADOR SUPERCONDUCTOR

SUPERCONDUCTIVE TUNNELING AND APPLICATIONS. L. Solymar. John Wiley & Sons, Inc., 1972.

IBM JOURNAL OF RESEARCH AND DEVELOPMENT. vol. 24, n.º 2; marzo, 1980.

LA GRAVEDAD EN LA TEORIA CUANTICA

THE ROLE OF EQUIVALENCE IN QUANTUM MECHANICS. Daniel Greenberger en *Annals of Physics*, vol. 47, n.º 1, págs. 116-126; marzo, 1968.

MAGNETIC FIELD EFFECTS ON DYNAMICAL DIFFRACTION OF NEUTRONS BY PERFECT CRYSTALS. A. Zeilinger y C. G. Shull en *Physical Review B*, vol. *B*19, n.º 8, págs. 3957-3962; 15 de abril de 1979.

MIELINA

GLIAL CELLS AND THE CENTRAL MYELIN SHEATH. Richard P. Bunge en *Physiological Reviews*, vol. 48, n.º 1, págs. 197-251; enero, 1968.

MYELIN. Dirigido por Pierre Morell. Plenum Press, 1977.

PROTEINS OF MYELIN AND THEIR METABOLISM. Joyce A. Benjamins y Pierre Morell en *Neurochemical Research*, vol. 3, n.º 2, págs. 137-174; 1978.

BASIC NEUROCHEMISTRY. Dirigido por R. W. Albers, G. W. Siegel, R. Katzman y B. W. Agranoff. Little, Brown and Co., en prensa.

EVOLUCION QUIMICA DEL MANTO TERRESTRE

LAS ROCAS MAS ANTIGUAS Y LA ACRECION DE LOS CONTINENTES. Stephen Moorbath en *Investigación y Ciencia*, n.º 8, págs. 66-81; mayo, 1977.

THE ORIGIN OF THE EARTH AND THE MOON. Alfred E. Ringwood. Springer-Verlag, 1979.

GEOCHEMICAL AND COSMOCHEMICAL APPLICATIONS OF ND-ISOTOPE ANALYSIS. R. K. O'Nions, S. R. Carter, N. M. Evensen y P. J. Hamilton en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 7, págs. 11-38; 1979.

GEOCHEMICAL MODELING OF MANTLE DIFFERENTIATION AND CRUSTAL GROWTH. R. K. O'Nions, N. M. Evensen y P. J. Hamilton en *Journal of Geophysical Research*, vol. 84, n.º B11, págs. 6091-6101; 10 de octubre de 1979.

CINEMATICA DEL CRECIMIENTO VEGETAL

PLANT ANATOMY. Katherine Esau. John Wiley & Sons, Inc., 1965.

MODELING OF PLANT GROWTH. R. O. Erickson en *Annual Review of Plant Physiology*, vol. 27, págs. 407-434; 1976.

KINEMATICS OF PLANT GROWTH. Wendy Kuhn Silk y Ralph O. Erickson en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 76, págs. 481-501; 1979.

LOS ORIGENES DE LA MINERIA DEL COBRE EN EUROPA

THE BEGINNINGS OF METALLURGY: A NEW LOOK. Theodore A. Wertime en *Science*, vol. 182, n.º 4115, págs. 875-887; 30 de noviembre de 1973.

A HISTORY OF METALLURGY. R. F. Tylecote. Metals Society, London, 1976.

L'ÂGE DU BRONZE EN EUROPE BARBARE: DES MÉGALITHES AUX CELTES. Jacques Briard. Éditions des Hespérides, 1976.

EL ASUNTO DE LOS RAYOS N

SUR DE NOUVELLES SOURCES DE RADIATIONS SUSCEPTIBLES DE TRAVERSER LES MÉTAUX, LE BOIS, ETC., ET SUR DE NOUVELLES ACTIONS PRODUITES PAR CES RADIATIONS. R. Blondlot en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 136, n.º 21, págs. 1227-1229; 25 de mayo de 1903.

ÉMISSION DE RAYONS N (RAYONS DE BLONDLOT) PAR L'ORGANISME HUMAIN, SPÉCIALEMENT PAR LES MUSCLES ET PAR LES NERFS. Aug. Charpentier en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciencies*, vol. 137, n.º 23, págs. 1049-1051; 14 de diciembre de 1903.

CAS D'ÉMISSION DE RAYONS N APRÈS LA MORT. Augustin Charpentier en *Comptes rendus hebdomaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 138, n.º 22, págs. 1351-1352; 30 de mayo de 1904.

THE N-RAYS. R. W. Wood en *Nature*, vol. 70, n.º 1822, págs. 530-531; 29 de septiembre de 1904.

PHOTOGRAPHIC RECORDS OF THE ACTION OF N-RAYS. En *Scientific American*, vol. 93, n.º 16, pág. 299; 14 de octubre de 1905.

HOW TO TELL THE BIRDS FROM THE FLOWERS, AND OTHER WOODCUTS. Robert Williams Wood. Dover Publications, Inc., 1959.

JUEGOS MATEMATICOS

HANDCUFFED DESIGNS. Stephen H. Y. Hung y N. S. Mendelsohn en *Aequationes Mathematicae*, vol. 11, n.º 2/3, págs. 256-266; 1974.

PROJECTIVE SPACE WALK FOR KIRKMAN'S SCHOOLGIRLS. Sister Rita (Cordia) Ehrmann en *Mathematics Teacher*, vol. 68, n.º 1, págs. 64-69; enero, 1975.

THE NINE PRISONERS PROBLEM. Dame Kathleen Ollerenshaw y Sir Hermann Bondi en *Bulletin of the Institute of Mathematics and Its Applications*, vol. 14, n.º 5-6, págs. 121-143; mayo/junio, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

STEREOPSIS IN DYNAMIC VISUAL NOISE. C. William Tyler en *Nature*, vol. 250, n.º 5469, págs. 781-782; 30 de agosto de 1974.

COHERENT MOTION AND STEREOPSIS IN DYNAMIC VISUAL NOISE. Joseph J. Mezrich y Albert Rose en *Vision Research*, vol. 17, n.º 8, págs. 903-910; 1977.

STEREO MOVEMENT FOR INNER OCULAR DELAY IN DYNAMIC VISUAL NOISE: A RANDOM SPATIAL DISPARITY HYPOTHESIS. C. W. Tyler en *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, vol. 54, n.º 6, págs. 374-386; 1977.

Taller y laboratorio

De los misterios del arco iris; en particular, sobre sus bellos arcos supernumerarios

Jearl Walker

En la sección de septiembre de 1977 les describí cómo pueden observarse los arcos iris comunes de primero y de segundo orden mediante un experimento sencillo. No les hablé entonces de las bandas de color suplementarias, llamadas arcos supernumerarios, que a veces acompañan a los arcos iris naturales. Este mes voy a describirles algunos experimentos que posibilitan la investigación de tales arcos supernumerarios.

El arco iris natural más corriente es el arco iris primario, o de primer orden, llamado así porque precisa de una reflexión de los rayos luminosos en el interior de las gotas de lluvia. Los arcos iris secundarios, o de segundo orden, más infrecuentes, precisan de dos reflexiones internas. Los arcos iris de órdenes superiores, en los que intervienen más de dos reflexiones internas, resultan probablemente demasiado tenues para que puedan verse en el cielo, pero sí pueden observarse en los experimentos que les describí en 1977. Mis observaciones respondían a cuestiones que me planteara mi abuela a propósito de un arco iris doble que decía haber visto. Las preguntas eran simples, pero las respuestas no.

En aquel primer examen quedaron sin contestar dos de las preguntas que me formuló mi abuela después de que yo hubiese comparado los colores del arco iris con los colores que proyecta un prisma de vidrio que se mantiene bajo la luz solar. Es evidente que mi respuesta excesivamente expeditiva no la dejó muy satisfecha. Una de las preguntas era: Si la separación de colores es en un arco iris igual que en un prisma, ¿por qué aparecen bandas de color suplementarias (habitualmente purpúreas) junto a los colores esperados? Las bandas adicionales se encuentran justo debajo del arco iris primario y (menos frecuentemente) justo encima del secundario. Los prismas no producen estas bandas de color suplementarias. La segunda pregunta era: ¿Cómo es posible que algunos arcos iris sean blancos? Volvemos a encontrarnos aquí con que no puede ser responsable de ellos una separación prismática de la luz.

Las bandas de color suplementarias son los arcos supernumerarios, nombre que implica que no debían presentarse. Lo cierto es que, si hemos de creer que las gotas de agua separan la luz blanca en sus componentes a la manera de un prisma, estos arcos supernumerarios resultan inesperados. Los experimentos que aclaran este fenómeno amplían los que entonces describí, pero ahora se incluyen los efectos de la interferencia ondulatoria de la luz que se dispersa desde una pequeña gota de agua. Estos experimentos, de fácil realización, revelan la belleza de la figura óptica de la que forman parte los colores del arco iris común.

En mi primera colaboración expuse cómo puede suspenderse una gotita de agua de un alambre que se mantiene vertical y después iluminarse con la luz blanca de un proyector. De todos los rayos luminosos que llegan a la gota, uno de ellos (el llamado rayo cartesiano en honor de René Descartes, que fue el primero en determinar su naturaleza) penetrará en la gota precisamente por el punto concreto que le permita emerger de ella para formar el arco iris primario. Los rayos que incidan sobre la gota en otros puntos no contribuirán a este arco iris.

En el montaje experimental que figura en la ilustración de la página 116, el rayo cartesiano que contribuye al arco iris primario penetra en la gota por el lado opuesto al observador. Después de refractarse en la gotita, este rayo se refleja una vez en la superficie interior y después sale de la gotita por el lado del observador. En la ilustración de la parte superior de la página 117, se representa la trayectoria del rayo vista desde arriba. Si se apunta adecuadamente el haz luminoso incidente (tarea que puede requerir un poco de paciencia), el rayo atravesará una sección transversal circular y horizontal de la gota y, cuando el observador tenga la cabeza en la posición correcta para interceptar el rayo emergente, se verán los colores del arco iris.

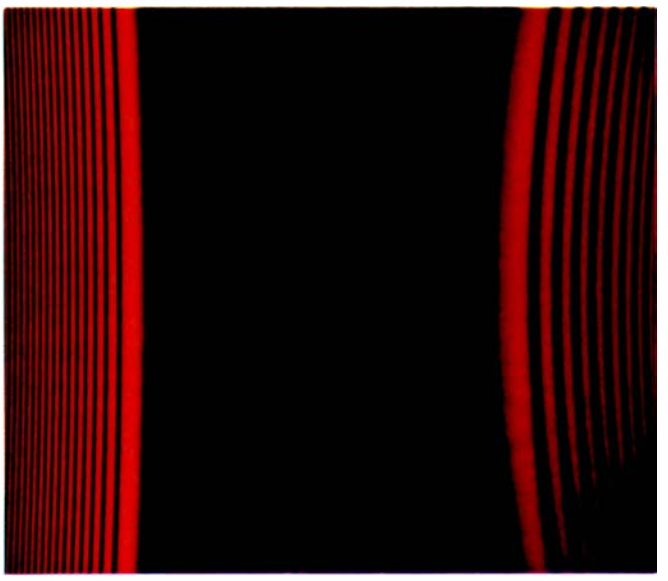
El rayo cartesiano correspondiente al arco iris primario se desvía unos 138 grados de su dirección de propagación inicial. Los demás rayos que penetran en la gotita y que se reflejan una vez en la superficie interior se desvían ángulos mayores, hasta los 180 grados que corresponden al rayo que entra en la gota por el centro y que es devuelto directamente a la fuente luminosa. Ningún rayo que se refleje una sola vez dentro de la gotita puede desviarse un ángulo menor que el del rayo cartesiano.

Si se ilumina la gotita con luz blanca, los colores componentes se refractan de forma ligeramente diferente y salen bajo ángulos distintos. El azul se refracta un poco más que el rojo, por lo que el rayo cartesiano azul gira respecto a su dirección de propagación original ligeramente más que el rojo. Los colores intermedios se desviarán en un rango cuantitativo intermedio.

Si se contempla la gotita bajo un ángulo próximo al ángulo del arco iris, los colores diferentes emergerán bajo ángulos diferentes y, en consecuencia, podrán distinguirse. El ángulo de desviación, medido respecto a la dirección inicial de la luz, es de unos 138 grados para el rojo y de 139 para el azul. Si nuestra gotita fuese una entre muchas que cayesen del cielo bajo la luz del Sol, un observador vería un arco de colores en el firmamento, es decir, el arco iris natural primario. En el caso de una gotita de agua suspendida de un alambre no existe tal arco, ya que se trata de una gotita aislada, pero sí pueden verse los colores sin dificultad en la cara de la gotita (la enfrentada a la fuente luminosa) por donde emergen los rayos.

Supongamos que la luz blanca se

Arco iris con arcos supernumerarios purpúreos fotografiado en California por Alan L. Falk



Figuras de interferencia de los dos primeros órdenes

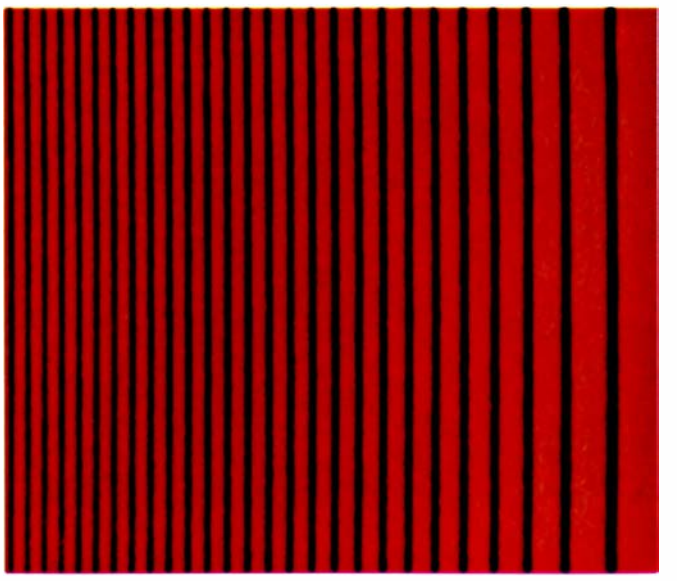


Figura de interferencia del arco iris primario

sustituye por luz monocromática procedente de una fuente tal como un láser de helio-neón, que emite a una longitud de onda de 632,8 nanómetros. Cabría esperar aquí que de la gotita sólo emergiese la componente roja del arco iris. Sorprendentemente, lo que se ve en realidad es una serie de bandas rojas verticales y no una banda roja única. La banda más ancha y más luminosa se encuentra en la posición angular que ocupa el rojo en los colores del arco iris producido por luz blanca. Las restantes bandas rojas, más débiles y más estrechas, se extienden en una serie que empieza en la banda más ancha y sigue hacia ángulos de desviación mayores. En esta serie de bandas adicionales se encierra la clave de la naturaleza de los arcos supernumerarios.

Sue Foroughi, de Council Bluffs, Iowa, ha investigado la figura de bandas rojas formada por una gotita de agua suspendida e iluminada por un láser de helio-neón. Mi diseño experimental lo ha perfeccionado sustituyendo el alambre por una bureta, de forma que ajustando cuidadosamente la espita de ésta fuera posible formar una gotita de agua en el extremo inferior del aparato. Seguidamente colocó la gotita en el centro de un espectrómetro con el fin de servirse del anteojo del aparato para observar la figura. (El efecto del anteojo es situar al observador a gran distancia de la gotita. Sin él, el ojo enfocaría la luz dispersada para dar en la retina una imagen de la gotita y no del espectro).

En especial, Foroughi se ha interesado por la relación entre tamaño de la gotita y número de bandas rojas que aparecen en la figura por grado. Sobre una gotita recién formada en el extremo de la bureta contó la densidad angular de bandas rojas desplazando el anteojo un ángulo de un grado. Tuvo que dar un valor aproximado del diámetro de la gotita. A continuación, esperó un tiempo para que la evaporación redujese el tamaño de la gotita y repitió el proceso.

La figura producida por una gotita de unos cuatro milímetros de diámetro inicial resultó tener una densidad de 16 bandas por grado en las cercanías de la banda principal del arco iris. Dos horas más tarde, el diámetro se había reducido a unos 2,5 milímetros y la densidad había descendido a ocho bandas. Foroughi halló que a medida que la gotita se encogía, aumentaba la anchura de las bandas y disminuía por tanto el número de éstas por grado. Resultado que nos da una pista sobre la naturaleza de los arco iris blancos por los que preguntaba mi abuela.

En mi montaje experimental, el rayo que permite al observador ver el arco iris secundario penetra en la gotita por el lado del observador. Se trata de un rayo cartesiano que se refracta en la gotita, se refleja dos veces en su superficie interior y emerge hacia el observador. Como antes, los distintos colores se refractan de forma suavemente distinta y así emergen bajo ángulos ligeramente diferentes. Un observador que se mueva entre los límites de los ángulos de estos colores verá el espectro que en el medio natural produce el arco iris secundario.

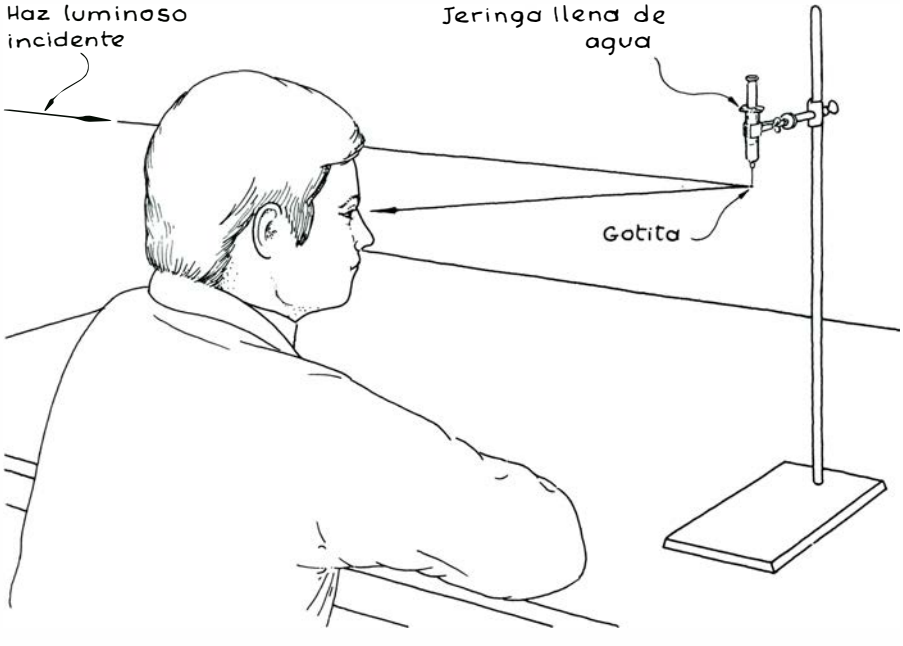
En el montaje experimental de la gotita suspendida, los colores aparecen en la cara de la gotita situada del lado de la fuente luminosa. El rayo cartesiano rojo emerge bajo un ángulo de unos 130 grados respecto a su dirección inicial de propagación, el rayo cartesiano azul a unos 127 grados. A estos ángulos voy a llamarlos ángulos de desviación del arco iris secundario.

Si la gota se ilumina totalmente, un observador puede recorrer los ángulos del arco iris primario y después los del secundario moviéndose desde un ángulo de desviación de unos 140 grados hasta un ángulo de unos 126 grados. La secuencia de colores irá del azul al rojo y seguidamente, tras una separación, del rojo al azul, ocupando los colores secundarios un espacio angular mayor. Entre ambas secuencias de colores la gotita estará relativamente oscura.

Esta banda oscura, que aparece también entre las franjas de los arcos iris naturales, se llama banda de Alejandro [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*]. Su oscuridad es consecuencia de la relativa falta de rayos luminosos que emerjan de una gotita de agua sobre ese espacio angular. En efecto, todos los rayos que se reflejen una vez dentro de las gotitas deberán emerger bajo ángulos de desviación de unos 138 grados o más; todos los rayos que se reflejen dos veces dentro de la gotita emergerán bajo ángulos de desviación de unos 130 grados o más. Por esta causa el espacio intermedio de unos ocho grados queda relativamente oscuro.

Cuando una fuente de luz blanca se sustituye por un láser de helio-neón, el arco iris secundario completo es sustituido por otra distribución de bandas rojas. La banda más luminosa y ancha vuelve a encontrarse en la posición ocupada por el rojo en el arco iris completo y las bandas verticales se extienden desde la posición angular del rojo normal hacia ángulos de desviación más pequeños, estrechándose progresivamente a medida que aumenta su distancia angular a la banda más luminosa.

Este tipo de figura es característico y propio de los arcos iris de los dos primeros órdenes. Los órdenes adicionales exhiben cada uno su propia figura al iluminar una gota con luz láser monocromática. Por ejemplo, el arco iris de quinto orden resulta de cinco reflexiones internas de la luz y, aunque



Montaje de laboratorio para investigar el arco iris

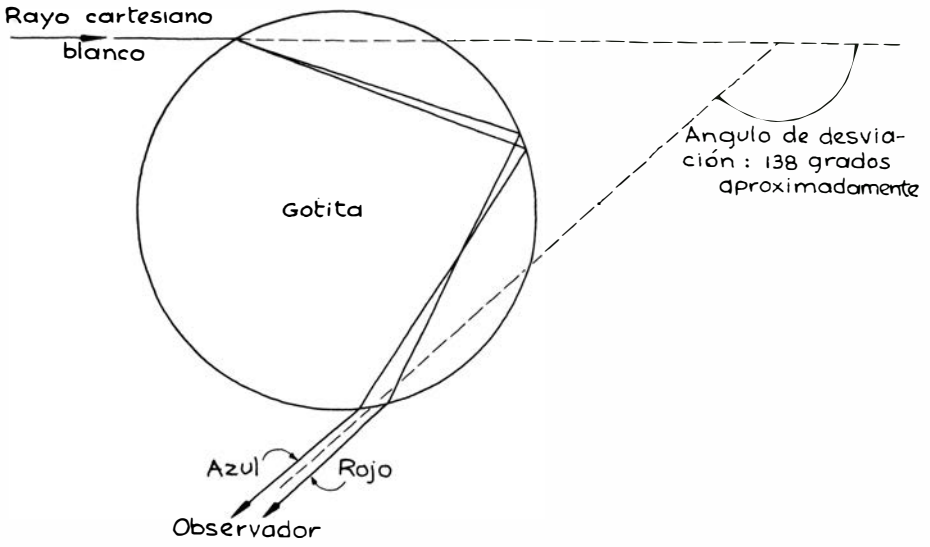
sea excesivamente tenue para que pueda verse en el cielo, sus colores son visibles en una gotita suspendida si se apunta con cuidado el haz de luz incidente.

El rayo cartesiano de quinto orden penetra en la gotita por el lado enfrentado al observador, se refleja cinco veces en el interior y emerge por la zona de la gotita enfrentada a la fuente luminosa. El rojo emerge bajo un ángulo de unos 127 grados con la dirección inicial de la luz, el azul bajo unos 134 grados. Cuando la luz blanca se sustituye por el láser, el arco iris de quinto orden da por resultado una distribución de bandas rojas, la más ancha y luminosa de las cuales está a unos 127 grados. Este espectro es más tenue que los espectros de los dos primeros órdenes. En general, cuanto mayor sea el orden de un arco iris, tanto más tenues y anchas serán las bandas principales de su espectro. Lo mismo ocurre en el caso de los arcos iris naturales: cuanto mayor es su orden, tanto más tenues y anchos resultan.

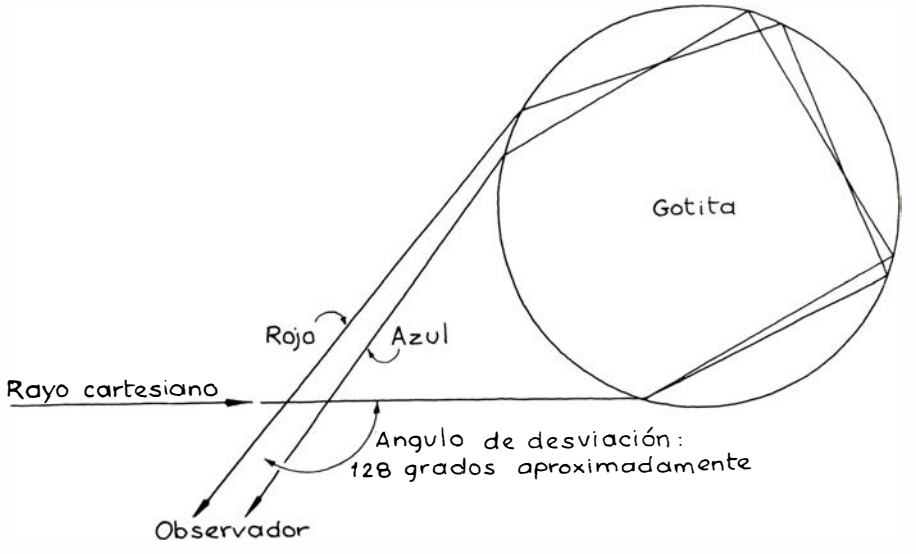
Cuando una gotita de agua se ilumina con luz blanca, cada uno de los colores produce su propia figura de bandas luminosas y oscuras en las cercanías de los ángulos del arco iris. Un arco iris natural se compone de las bandas principales (más anchas y brillantes) de cada color. Aunque en él también existan las bandas más estrechas y tenues del espectro de cada uno de los colores, éstas son habitualmente imperceptibles. En ocasiones, no obstante, las bandas más tenues se solapan con precisa corrección para hacerse visibles. Estas bandas son los arcos supernumerarios, que en el dispositivo experimental y en la naturaleza aparecen en el lado del azul del arco iris.

Cuando repetí algunos de los experimentos de Foroughi y algunos de los primeros míos, dispuse una gotita de agua colgando de la aguja de una jeringa. Para ello aplané la punta amolándola de modo que, con la jeringa apuntada hacia abajo, se pudiese formar una gotita que colgase convenientemente al empujar el émbolo. La óptica de un arco iris se hace mucho más complicada de lo descrito si los rayos luminosos no atraviesan la gotita de agua por una sección transversal circular y de aquí que sea deseable conseguir una gotita que cuelgue vertical y tenga una sección transversal circular y horizontal.

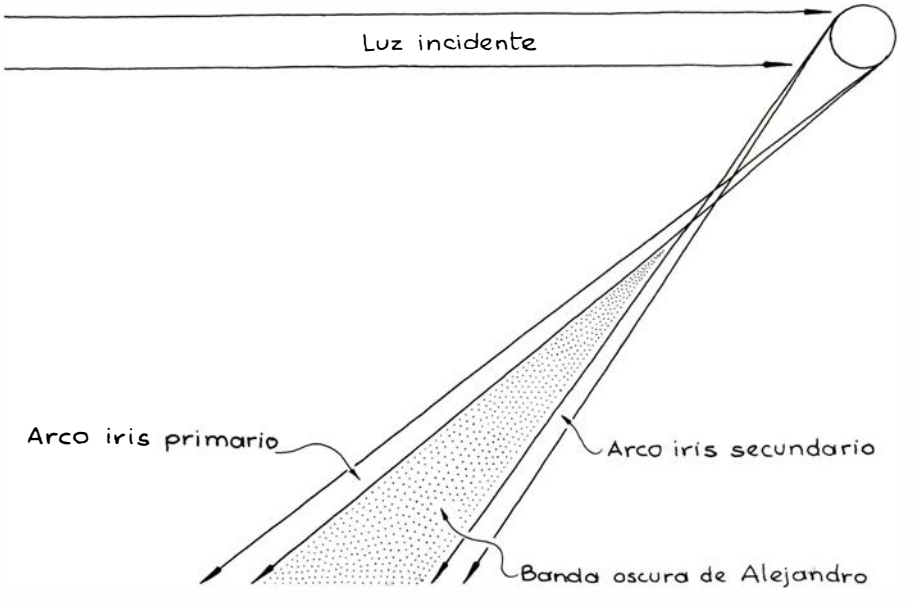
Coloqué la jeringa en posición utilizando una pinza para tubos de ensayo y



Dispersión de la luz en el arco iris primario

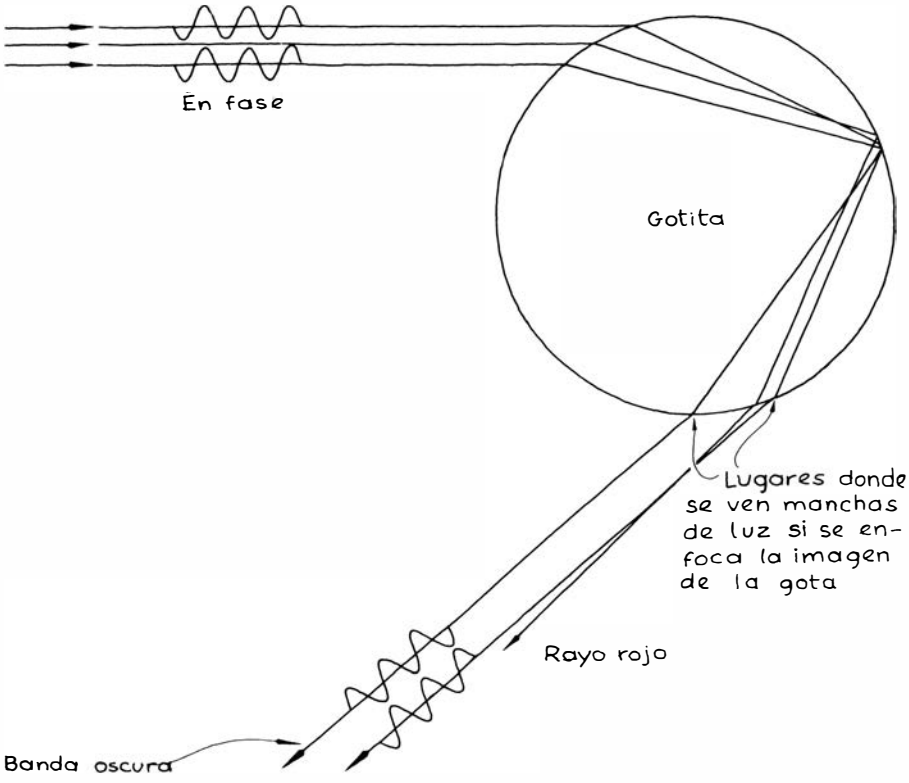


Cómo se dispersa la luz en el arco iris secundario

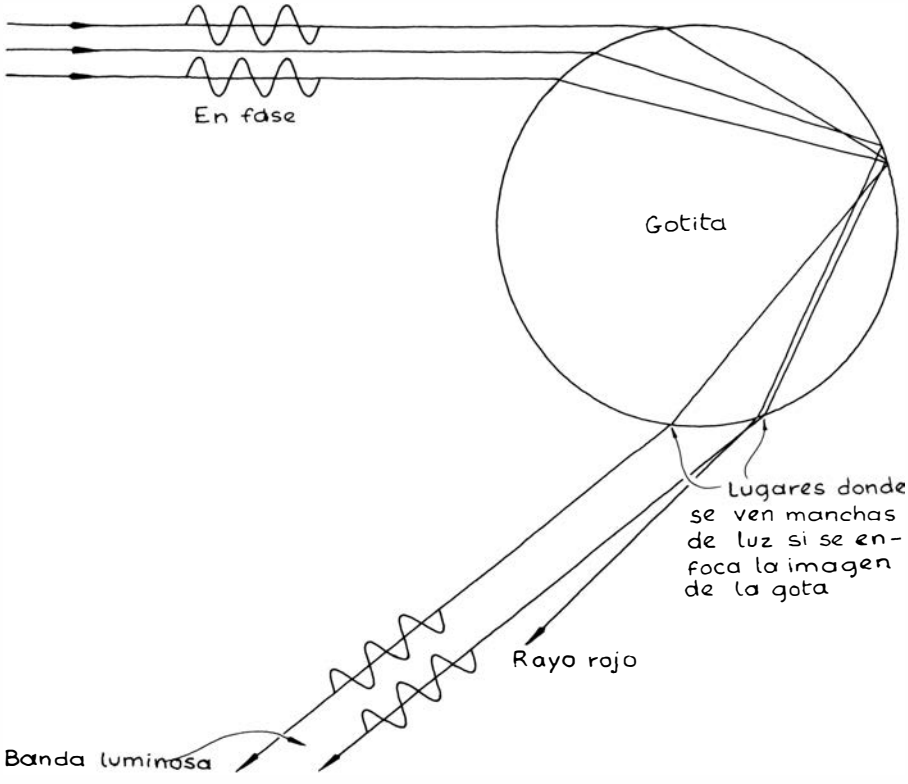


Circunstancias responsables de la banda oscura de Alejandro

un soporte de laboratorio, asentándola bien dentro de la pinza con un trozo de caucho esponjoso. Apretando poco a poco el émbolo, podía formar entonces una gota pequeña o una de gran tamaño en la punta roma de la aguja. Las gotas recibieron la iluminación de un láser de helio-neón de 35 miliwatt. A quien repita este ensayo le sugiero que emplee un láser menos potente o que coloque filtros en el haz con el fin de atenuarlo, ya que la luz reflejada en la aguja e incluso en la gota resultaba peligrosa e incómodamente brillante.



Interferencia destructiva de dos rayos



Interferencia constructiva

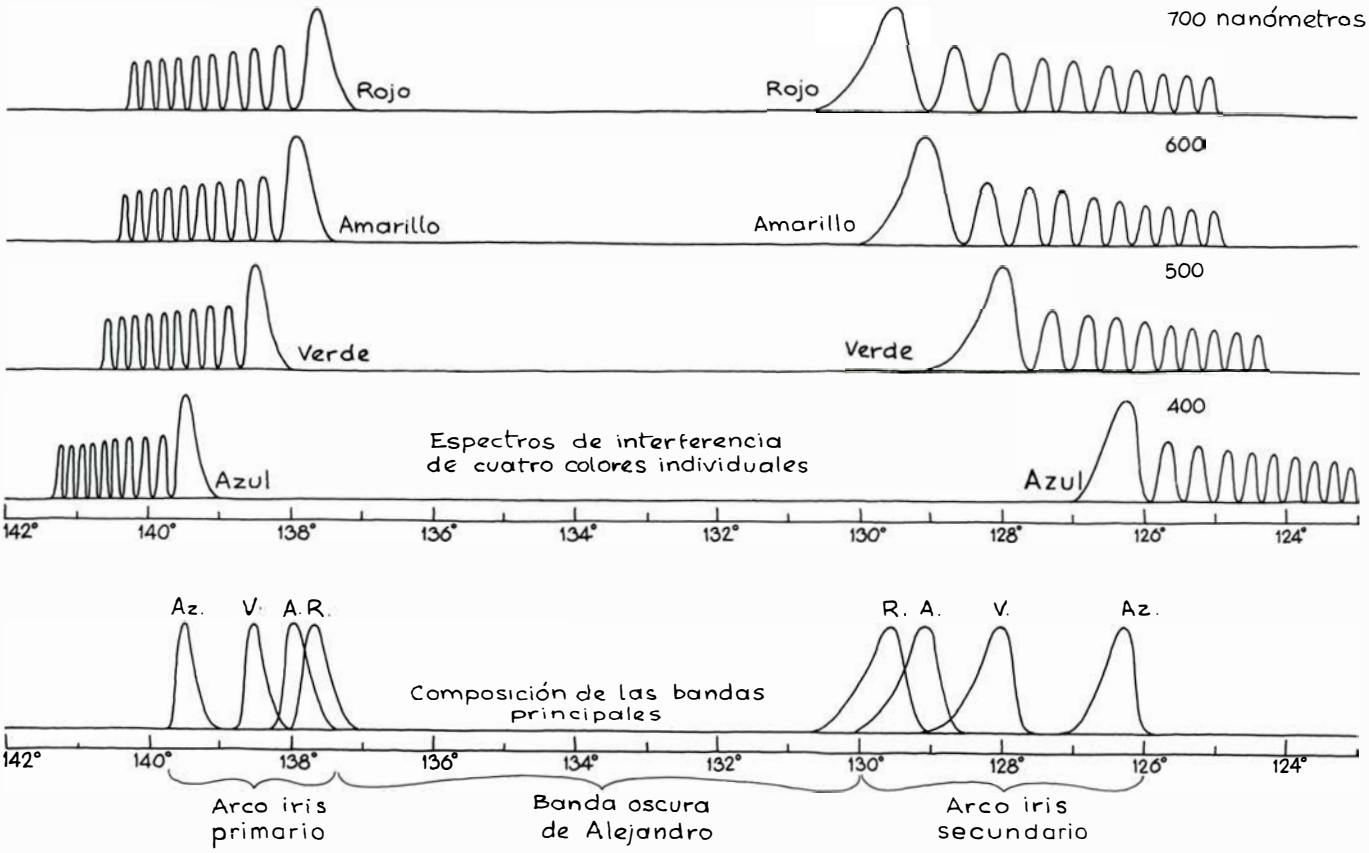
Si el láser es de luz polarizada, la polarización debe ser vertical para que la gota disperse la luz de la forma conveniente.

Regulando la iluminación sobre la gotita conseguí la figura tanto del arco iris primario como del secundario. Así, iluminando la zona de la gota más próxima a mí se creaba la figura del arco iris secundario e iluminando la otra zona se creaba el primario. Dado que el haz era más estrecho que las gotitas, al menos en el caso de las gotas mayores, no me era posible conseguir ambas figuras a la vez; sin embargo, al intercalar una lente en el haz, éste se abrió lo bastante para crear las dos simultáneamente.

Como mi láser era muy brillante las figuras se proyectaban en las paredes de la habitación con intensidad considerable. Además pude ponerlas de manifiesto sin dificultad sosteniendo una hoja de papel blanco cerca de la gota y examinarlas por el visor de mi cámara. Iluminando adecuadamente la zona más afectada de la gotita, pude ver los espectros parcialmente solapados de los arcos iris de primer y quinto orden.

La mejor forma de alinear la luz con la gotita es utilizando la sombra de ésta sobre una pared. Para ello, mientras contemplaba la sombra de la gotita manipulé el láser hasta centrar el haz en ella. Con este procedimiento, si deseaba iluminar uno de los lados de la gotita más que el otro, bastaba con desplazar el láser lo conveniente. A veces colocaba una tarjeta negra en el haz para obstruir la luz incidente sobre uno de los lados de la gotita. También empleé esta tarjeta para evitar que la luz del láser diese sobre la aguja, que de otro modo producía un fulgor deslumbrante.

Con mi cámara de 35 milímetros, cargada con película de 64 ASA y desprovista de objetivo, fotografié los espectros con una exposición de 1/125 de segundo. Para fotografiar los arcos iris de los dos primeros órdenes situé la cámara y el trípode lo más cerca posible de la gotita de agua suspendida sin interceptar el haz del láser con la cámara. Alejando la cámara de la gotita pude ampliar la imagen sobre la película. Esta operación ponía más de manifiesto sus detalles, pero acrecentaba los efectos adversos de las vibraciones de la gotita. Las vibraciones se debían a las corrientes de aire y a las vibraciones del edificio, que sacudían la gota y destruían momentáneamente la sección transversal circular perfecta



Figuras de interferencia que forman los arcos iris de los dos primeros órdenes

atravesada por los rayos luminosos, con lo que el espectro tremolaba. Reduje estas vibraciones a un mínimo afianzando el soporte con bloques de hormigón. Los efectos en cuestión podían rebajarse trasladando el experimento al sótano o montando la instalación sobre una plataforma de tipo antivibratorio como las que se usan para hacer hologramas.

Cuando quise fotografiar la gotita de agua, pero no las bandas rojas, monté en la cámara su objetivo normal (50 milímetros y f/1,4) y varias lentes de aproximación con el fin de enfocar los rayos dispersados por la gotita. La exposición adecuada hube de determinarla por tanteo y para asegurarme unas cuantas fotos de buena calidad accioné la cámara bajo muchas exposiciones.

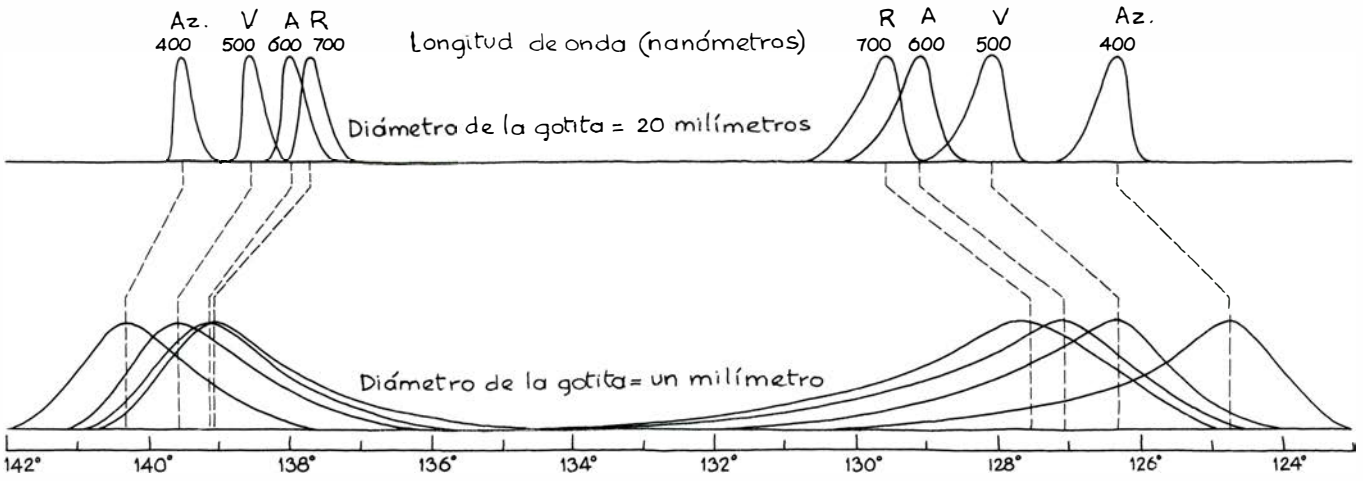
En lugar de esperar a que cada gotita encogiese por evaporación, observé las figuras de los arcos iris de los dos primeros órdenes mientras empujaba lentamente el émbolo de la jeringa. A medida que la gotita aumentaba de tamaño, pude ver cómo se estrechaban las bandas del espectro. Noté además otro efecto y es que las posiciones angulares de las bandas principales (la más luminosa y ancha de cada espectro) se desplazaban, de forma que a la vez que crecía la gotita las bandas principales de ambos órdenes se acercaban una a la otra, estrechándose así la zona oscura intermedia. Si la gota es grande (de unos cuatro milímetros de diámetro, más o menos), las figuras están relativamente próximas y se componen de bandas relativamente estrechas. Cuando la gota se encoge, las figuras se desplazan alejándose entre sí y las bandas se ensanchan.

¿Por qué una fuente de luz monocromática produce una distribución de bandas luminosas y oscuras en la proximidad de la posición angular normal del arco iris? Está claro que las gotas no separan los colores de la misma forma que lo haría un prisma. Thomas Young demostró en 1803 que las ondas luminosas podían interferir entre sí para producir figuras de bandas luminosas y oscuras. Pues bien, las figuras que Foroughi y yo hemos visto se deben a este tipo de interferencias luminosas.

Consideremos dos rayos luminosos que iluminan una gotita suspendida en las proximidades de cada uno de los lados del rayo cartesiano que finalmente emerge formando el arco iris primario. Elijamos unos rayos que se reflejen una vez dentro de la gotita (precisamente como el rayo cartesiano) y que emerjan en la misma dirección. (Por supuesto, la dirección no será la misma que la del rayo cartesiano, pero si el observador se encuentra en el ángulo correcto, verá ambos rayos.) Cuando los rayos salen del láser están en fase, es decir, las ondas que representan están sincronizadas exactamente. No obstante, al separarse saliendo de la gotita los rayos recorren distancias diferentes y, como resultado, emergen de ella con una relación de fase que puede haber variado respecto a la original.

Supongamos que uno de los rayos haya viajado una semilongitud de onda más que el otro. (En un cálculo exacto se incluiría la variación de la longitud de onda de la luz cuando ésta se encuentra en el agua.) Cuando los rayos emerjan, el primer rayo estará rezagado respecto al segundo en una semilongitud de onda. Puesto que un observador en una posición correcta verá ambos rayos a la vez, éstos se interfieren destructivamente, lo que significa que el observador advertirá oscuridad porque los rayos (que difieren en una semilongitud de onda) están exactamente en oposición de fase.

Consideremos seguidamente la situación cuando el observador se desplaza ligeramente hacia ángulos de desvia-



Forma en que se superponen las bandas principales en una gota pequeña

ción mayores. Otra vez podrán verse dos rayos luminosos (otros distintos ahora) emergiendo de la gotita. Supongamos que la distancia viajada de más por uno de ellos sea una longitud de onda completa. Cuando dos rayos iguales se encuentran inicialmente sincronizados, un desplazamiento de uno de ellos de una longitud de onda completa lo coloca nuevamente en sincronismo. Entonces, los rayos se interfieren de una forma constructiva y el observador verá una banda luminosa, y si la luz es roja el observador verá una banda roja luminosa.

Al aumentar el ángulo de desviación las bandas luminosas y oscuras se alternan. La primera banda oscura, contigua a la luminosa principal, aparece por la interferencia de dos rayos defasados una semilongitud de onda. La segunda banda oscura se debe a otros dos rayos defasados 3/2 de longitud de onda, la tercera y cuarta bandas se deben a rayos defasados 5/2 y 7/2 de longitud de onda, respectivamente, y así sucesivamente.

Los rayos que emergen formando la banda más luminosa y ancha están en fase. La siguiente banda luminosa del espectro resulta de dos rayos que emergen defasados una longitud de onda completa. Las demás bandas luminosas del espectro resultan de otros rayos defasados una longitud de onda adicional cada vez. Si un observador se coloca frente a la figura de interferencia formada por la gotita de agua, verá siempre una banda luminosa o una oscura producida por dos rayos que emergen de la gotita. Y si mira directamente a ésta, verá dos manchas de luz en el lugar por donde emergen ambos rayos.

Si se desplaza hacia el ángulo del arco iris, verá que las dos manchas se mueven acercándose una a otra y que acaban por fundirse para constituir el rojo del arco iris.

Si se ilumina la gotita con luz blanca, cada color produce una figura de interferencia y sólo se aprecian las bandas luminosas principales de cada uno de ellos. Los primeros cálculos de la intensidad luminosa de los espectros los realizó George B. Airy en 1838. Sus resultados correspondientes a cuatro colores se ofrecen en la ilustración de la página anterior. Cada longitud de onda genera una figura de interferencia cuya banda principal se halla próxima al ángulo que predijeron las teorías de Young y Descartes para el color correspondiente del arco iris.

En los cálculos de Airy se tiene en cuenta el tamaño de la gotita, puesto que éste determina si los rayos que emergen de ella bajo un ángulo diferente del ángulo del arco iris dan luminosidad u oscuridad. El tamaño de la gotita determina también el ángulo exacto bajo el que aparece el arco iris; así, cuanto menor sea la gotita, tanto mayor resultará la discrepancia entre los ángulos de los colores y los ángulos predichos por las teorías anteriores. A medida que una gota disminuye de tamaño por evaporación, los espectros de los distintos colores cambian de dos maneras: los espectros de los arcos iris de los dos primeros órdenes se separan entre sí y las bandas luminosas se hacen más anchas. Ninguno de estos dos cambios está predicho en las teorías primitivas, en las que no describe el arco iris como una figura de interferencia.

Oprimiendo el émbolo de la jeringa, aumenta de tamaño la gotita y puede verse sin dificultad el desplazamiento resultante de las figuras. A medida que la gotita se hace mayor, las figuras de los arcos iris de los dos primeros órdenes se irán acercando. También se ve fácilmente que la anchura de cada banda brillante disminuye. Dejando que la gotita se encoja lentamente por evaporación, tienen lugar los correspondientes cambios en sentido contrario, como Foroughi observó.

La dependencia de las figuras respecto del tamaño de la gota tiene otra consecuencia. Cuando la gota es relativamente grande (de algunos milímetros de diámetro), son distinguibles las bandas brillantes principales en las figuras separadas de cada uno de los colores. Todas las bandas de cada uno de los colores son muy estrechas. Cuando en la gota penetra luz blanca el observador ve un arco iris bajo el ángulo del arco iris. Si la gota es más pequeña las bandas principales se ensanchan y se solapan y, entonces, el observador ya no puede distinguir los colores con tanta facilidad y el arco iris parece como desteñido [*véase la ilustración de esta misma página*].

Si la gotita es aún más pequeña, de un diámetro de 0,3 milímetros o menos, las bandas principales se solapan tanto que el arco iris es blanco. Y este es el arco iris blanco por el que me preguntó mi abuela. Su aparición, muy poco frecuente, sólo se da en lloviznas de gotitas suficientemente pequeñas para producir el solapamiento de las bandas principales bajo el ángulo del arco iris. Si en mi experimento se deja que la gota suspendida de la jeringa se evapore, puede verse cómo se destiñen lentamente los colores del arco iris.

Se han propuesto teorías acerca del arco iris más modernas y exactas que las de Descartes, Young y Airy. En 1908 Gustav Mie ideó un sistema para calcular las amplitudes de las ondas luminosas dispersadas por una gota.

Estos cálculos prometían resultados más exactos que las teorías anteriores, pero requieren tantas operaciones que ni siquiera los ordenadores modernos de gran velocidad pueden llevarlos a término. Para gotas de varios milímetros de diámetro las teorías antiguas daban resultados suficientemente aceptables; las dificultades aparecían al considerar gotas pequeñas. Hace tres años se expuso en esta revista un enfoque del tema más factible, conocido como teoría del momento cinético complejo del arco iris [véase "Teoría del arco iris", por H. Moisés Nussenzveig; INVESTIGACION Y CIENCIA, junio de 1977]. En la bibliografía final aportamos otras referencias acerca de la teoría del arco iris.

La luz de un arco iris natural está fuertemente polarizada en la dirección paralela a su arco. El mismo lector puede comprobarlo haciendo girar un filtro polarizador situado entre su ojo y un arco iris. Para una cierta orientación, el arco iris es muy brillante; haciendo girar el filtro 90 grados, el arco iris desaparece casi por completo.

Con la luz dispersada por una gotita de agua suspendida puede hacerse una observación similar. Si la gota se ilumina con luz procedente de un proyector, la luz incidente no está polarizada, pero puede suponerse compuesta de dos sentidos de polarización ortogonales. Uno de éstos yace en el plano definido por el proyector, el observador y la sección transversal de la gotita atravesada por el rayo luminoso. El otro sentido es perpendicular a este plano. La luz incidente polarizada en el primero de los sentidos es dispersada muy pobremente por la gotita y contribuye poco al arco iris. La luz incidente polarizada perpendicularmente al plano es la responsable fundamental del arco iris.

La luz producida por mi láser está polarizada verticalmente a causa de las ventanas de Brewster instaladas dentro de la cavidad del láser, disposición muy corriente en los láseres de gas. Por tanto, la luz está convenientemente polarizada para que atraviese una gotita suspendida por una sección transversal horizontal y cree un arco iris de colores brillantes. Al girar el tubo del láser se ve que la imagen del arco iris se hace más mortecina. Girando el láser 90 grados, el haz queda polarizado paralelamente al plano del láser, de la gotita y del observador y, entonces, el sentido de polarización de la luz que penetra en la gotita no es el adecuado y la figura del arco iris se debilita tanto que apenas es visible.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MICORRIZAS

THE BIOLOGY OF MICORRHIZA. J. L. Harley. Leonard Hill Press, 1972.

THE *ENDOGONACEAE* IN THE PACIFIC NORTHWEST. J. W. Gerdemann y J. M. Trappe en *Mycologia Memoir n.º 5.* The New York Botanical Garden, 1974.

ENDOMYCORRHIZAS. Editado por F. E. Sanders, B. Mosse y P. B. Tinker. Academic Press, 1975.

INTERACTIONS BETWEEN NON-PATHOGENIC SOIL MICROORGANISMS AND PLANTS. Editado por Y. Dommergues y S. V. Krupa. (Especialmente cap. 10, D. S. Hayman) Elsevier Scientific Publishing Company, 1978.

FERTILIZANTES MICROBIANOS: INTERACCIONES DE *RHIZOBIUM* Y HONGOS DE LAS MICORRIZAS V-A EN LA FORMACION Y EFICACIA DE SUS RESPECTIVAS SIMBIOSIS CON LEGUMINOSAS. C. Azcón-G. de Aguilar (dirigida por J. M. Barea). Tesis Doctorales de la Universidad de Granada, 1980.

METEORITOS BASALTICOS

A PETROGENETIC MODEL OF THE RELATIONSHIPS AMONG ACHONDRITIC METEORITES. Edward M. Stolper, Harry Y. McSween, Jr., y James F. Hays en *Geochimica et Cosmochimica Acta,* vol. 43, n.º 4, págs. 589-602; abril, 1979.

ALLAN HILLS 77005: A NEW METEORITE TYPE FOUND IN ANTARCTICA. Harry Y. McSween, Jr., Lawrence A. Taylor y Edward M. Stolper en *Science,* vol. 204, n.º 4398, págs. 1201-1203; 15 de junio de 1979.

PETROLOGY AND ORIGIN OF THE SHERGOTTITE METEORITES. Edward M. Stolper y Harry Y. McSween, Jr., en *Geochimica et Cosmochimica Acta,* vol. 43, n.º 9, págs. 1475-1498; septiembre, 1979.

CHAQUETE POR ORDENADOR

SOME NECESSARY CONDITIONS FOR A MASTER CHESS PROGRAM. Hans J. Berliner en *The Third International Joint Conference on Artificial Intelligence.* Stanford Research Institute, 1973.

ON THE CONSTRUCTION OF EVALUATION FUNCTIONS FOR LARGE DOMAINS. Hans Berliner en *The Fifth International Joint Conference on Artificial Intelligence.* Stanford Research Institute, 1979.

FISIOLOGIA DE LAS PLAQUETAS SANGUINEAS

PLATELET BEHAVIOR AND BIOCHEMISTRY. H. Holmsen, L. Salganicoff y M. H. Fukami en *Haemostasis: Biochemistry, Physiology, and Pathology,* dirigido por D. Ogston y B. Bennett. John Wiley & Sons, 1977.

PLATELETS, THROMBOSIS AND ATHEROSCLEROSIS. J. F. Mustard, S. Moore, M. A. Packham y R. L. Kinlough-Rathbone en *Progress in Biochemical Pharmacology,* vol. 13, págs. 312-325; 1977.

TEORIAS GAUGE DE LAS FUERZAS ENTRE PARTICULAS ELEMENTALES

CONSERVATION OF ISOTOPIC SPIN AND ISOTOPIC GAUGE INVARIANCE. C. N. Yang y R. L. Mills en *Physical Review,* vol. 96, n.º 1, págs. 191-195; 1 de octubre de 1954.

UNIFIED THEORIES OF ELEMENTARY-PARTICLE INTERACTION. Steven Weinberg en *Scientific American,* vol. 231, n.º 1, págs. 50-59; julio, 1974.

QUARKS WITH COLOR AND FLAVOR. Sheldon Lee Glashow in *Scientific American,* vol. 233, n.º 4, págs. 38-50; octubre, 1975.

SUBSISTENCIA EN EL NORTE DE ESPAÑA

THE FOOD CRISIS IN PREHISTORY: OVERPOPULATION AND THE ORIGINS OF AGRICULTURE. Mark Nathan Cohen. Yale University Press, 1977.

LATE AND POST-PLEISTOCENE INDUSTRIES AND FAUNA FROM THE CAVE SITE OF LA RIERA. G. A. Clark y L. Richards en *Views of the Past: Essays in Old World Prehistory and Paleoanthropology.* Ninth International Congress of Anthropological and Ethnological Sciences, dirigido por Leslie G. Freeman. Mouton, 1978.

LA HIPOTESIS DEL GAS DE LAS PROFUNDIDADES TERRESTRES

DUPLEX ORIGIN OF PETROLEUM. Sir Robert Robinson en *Nature,* vol. 199, n.º 4889, págs. 113-114; 13 de julio de 1963.

BRONTIDES: NATURAL EXPLOSIVE NOISES. Thomas Gold y Steven Soter en *Science,* vol. 204, n.º 4391, págs. 371-375; 27 de abril de 1979.

SELECCION SEXUAL EN *HYLOBITTACUS APICALIS*

SEXUAL SELECTION AND NUPTIAL FEEDING BEHAVIOR IN *BITTACUS APICALIS* (INSECTA: MECOPTERA). Randy Thornhill en *American Naturalist,* vol. 110, n.º 974, págs. 529-548; julio-agosto, 1976.

INSECT BEHAVIOR. Robert W. Matthews y Janice R. Matthews. John Wiley & Sons, 1978.

MALE AND FEMALE SEXUAL SELECTION AND THE EVOLUTION OF MATTING STRATEGIES IN INSECTS. Randy Thornhill en *Sexual Selection and Reproductive Competition in Insects,* dirigido por Murray S. Blum y Nancy A. Blum. Academic Press, 1979.

JUEGOS MATEMATICOS

FINITE GROUPS. Daniel Gorenstein. Harper and Row, 1968.

THE SEARCH FOR FINITE SIMPLE GROUPS. Joseph A. Gallian en *Mathematics Magazine,* vol. 49, n.º 4, págs. 163-180; septiembre, 1976.

GROUPS AND SYMMETRY. Jonathan L. Alperin en *Mathematics Today,* dirigido por Lynn Arthur Steen. Springer-Verlag, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

THE RAINBOW: FROM MYTH TO MATHEMATICS. Carl B. Boyer. Thomas Yoseloff, 1959.

MULTIPLE RAINBOWS FROM SINGLE DROPS OF WATER AND OTHER LIQUIDS. Jearl D. Walker en *American Journal of Physics,* vol. 44, n.º 5, págs. 421-433; mayo, 1976.

ANGULAR SCATTERING AND RAINBOW FORMATION IN PENDANT DROPS. Kenneth Sassen en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 69, n.º 8, págs. 1083-1089; agosto, 1979.

COMPLEX ANGULAR MOMENTUM THEORY OF THE RAINBOW AND THE GLORY. H. M. Nussenzveig en *Journal of the Optical Society of America,* vol. 69, n.º 8, págs. 1068-1079; agosto, 1979.

Taller y laboratorio

Aprovechando cómo actúan las fuerzas, el judo logra que los débiles compitan con los fuertes

Jearl Walker

El judo y el aikido son artes marciales para las cuales se requiere una comprensión intuitiva de las leyes físicas relativas a las fuerzas, momentos de giro, equilibrio y movimientos de rotación. Este mes voy a examinar algunas de las llaves fundamentales de estas dos formas de lucha. No me es posible expresar exactamente la habilidad y desenvoltura que exige cada una de estas llaves; no obstante, sí es posible separarlas en componentes que puedan examinarse en términos de la mecánica clásica. Las experiencias que voy a describir necesitan la puesta en práctica real de las llaves, pero ello sólo deberá hacerse bajo la vigilancia de un experto, ya que ambos tipos de lucha pueden resultar peligrosos para el lector y su contrincante.

En el judo, el propósito principal es hacer perder el equilibrio al contricante. El arte reside en anticiparse a sus movimientos y en la coordinación de las respuestas propias, con la idea de evitar forzarle a una resistencia firme que opondría su fuerza física a la nuestra. Siempre que eluda las pruebas de fuerza, todo practicante de judo de corta estatura y bien adiestrado tendrá una ventaja muy marcada frente a contrincantes de mayor estatura pero inexpertos.

Probablemente el mejor ejemplo de esta ventaja lo encontremos en la proyección de cadera básica, cuya mayor eficacia se da frente a un adversario de mayor estatura y más lento. En un encuentro de judo normal nos enfrentamos al contrario asiéndole con las manos las solapas u hombros de su vestimenta. Para ejecutar esta proyección se adelanta el pie derecho hasta un punto situado entre los pies del contrario, tirando de él hacia abajo y hacia nuestra derecha. La llave surte efecto si se le ha sorprendido en el preciso momento en que adelantaba el pie derecho. En ese instante, seguirá manteniéndose estable si tiramos de él de frente hacia nosotros; pero, a causa de la posición de sus pies, lo será considerablemente menos si tiramos de él hacia nuestra derecha.

A la vez que se adelanta el pie propio hay que encorvar el cuerpo hacia adelante, de forma que la cabeza nos quede a la altura del hombro del contrario. Después, y muy rápidamente, se gira hacia atrás la cadera izquierda al tiempo que se tira de él hacia nuestra cadera derecha. Aquí debe producirse el primer contacto de ambos cuerpos durante el movimiento. Si seguimos tirando de él y girando hacia atrás la cadera izquierda hasta que nos encontremos mirando en la misma dirección que el contrario, a éste le habremos hecho girar en torno a nuestra cadera derecha, proyectándolo sobre la colchoneta.

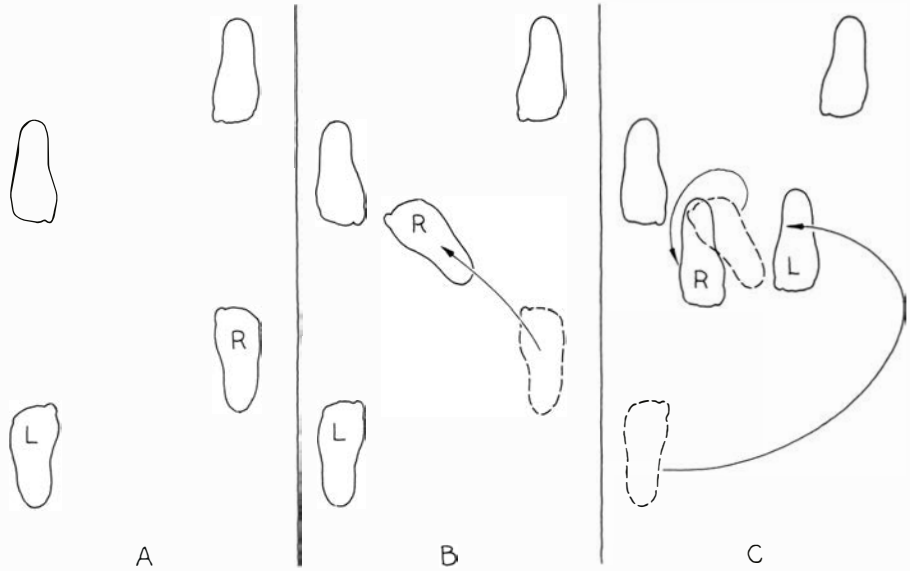
Como al contrario no se le debe lastimar, durante la caída seguimos asiéndole de la vestimenta, de suerte que aterrice sobre su lado izquierdo y pueda dar un palmetazo a la colchoneta con la mano izquierda durante el impacto. El efecto del palmetazo es repartir la fuerza de impacto sobre una superficie mayor, con lo que la presión sobre sus costillas no será suficiente para lastimarlo. Gran parte del entrenamiento de judo para principiantes se refiere a cómo sincronizar el palmetazo para que coincida con el impacto. La única vez que resulté lastimado practicando este deporte fue cuando no conseguí dar el palmetazo correctamente.

En la proyección de cadera son fundamentales la coordinación y una ejecución suelta y fluida, pero también es necesario comprender su mecánica, en especial en lo referente a los momentos de giro y al centro de masa. El centro de masa del contrario es el centro geométrico de su distribución de masa, y puede considerarse como el punto donde la fuerza gravitatoria actúa sobre el conjunto de su cuerpo, razón por la cual a veces se llama centro de gravedad. El oponente se encuentra en equilibrio en tanto que su centro de masa se mantenga encima de la superficie de apoyo delimitada por sus pies. Cuando permanece erguido en postura normal, tiene su centro de masa situado aproximadamente entre la espina dorsal y el ombligo; por tanto, estará en equilibrio hasta que le forcemos o le engañemos para que desplace su centro de gravedad, o para que pierda parte de la superficie de apoyo.

Supongamos que durante una llave conseguimos desplazar el centro de masa del contrario delante de sus pies. Entonces, aun cuando ya no apliquemos la llave, la atracción gravitatoria actuante en su centro de masa creará un momento de giro capaz de derribarlo. Para calcular un momento de giro hay que multiplicar dos cantidades: la fuerza actuante que produce la rotación y el brazo de palanca entre el centro de giro y la fuerza. El brazo de palanca es la distancia en perpendicular desde el centro de giro hasta la línea recta que contiene a la fuerza. Cuando hayamos hecho perder la estabilidad al contrario, la fuerza que puede hacerlo girar en torno de sus pies, llevándolo a la colchoneta, es la atracción gravitatoria. Esta fuerza, que no es sino su peso, la representaré mediante un vector que parte del centro de masa y señala hacia abajo. Así pues, el brazo de palanca será la distancia horizontal desde el centro de giro situado en sus pies y una prolongación de la recta vertical que contiene al vector peso. El momento de giro actuante sobre un contrario desestabilizado es el producto de su peso por el brazo de palanca. Cuando el contrario está erguido, el brazo de palanca correspondiente a su vector peso es nulo, por lo que el momento de giro será también nulo. Cuando se le sorprende con el centro de masa en una posición adelantada respecto a sus pies, el brazo de palanca ya no es cero y el momento de giro resultante provoca su rotación. Cuanto mayor sea el brazo de palanca (o sea, cuanto más inclinado esté), tanto mayor será el momento de giro. En el judo, uno de los objetivos es engañar al contrario para llevarlo a una posición inestable con tanta rapidez que no le sea posible recuperarse y, una vez conseguido esto, continuar la ejecución de la llave aplicándole otro momento de giro tal que acabe en la colchoneta antes de que intente siquiera recobrar el equilibrio.

En la proyección de cadera se comienza tirando de la vestimenta del contrario con el fin de hacerle perder la estabilidad. Si tirásemos directamente hacia nosotros, no sería fácil conseguir esta inestabilidad, ya que su centro de masa se trasladaría por encima de su pie adelantado, pero entonces él podría mantener el equilibrio doblando la rodilla correspondiente. En estas condiciones, para hacerle perder estabilidad tendríamos que desplazar su centro

Proyección de cadera básica del judo



Juego de pies en la proyección de cadera

de masa una distancia relativamente grande hasta que estuviese fuera de su pie adelantado, movimiento que requeriría un esfuerzo de tracción vigoroso y prolongado, que él podría contrarrestar rápidamente.

Una manera más sencilla de hacer perder estabilidad al contrario es tirar de él hacia nuestra derecha, ya que en dicha dirección su centro de masa debe recorrer sólo una distancia relativamente corta para alcanzar una vertical que no pase por la superficie de apoyo. Probablemente no pueda contrarrestar un tirón de este tipo antes de que aparezca la inestabilidad y, a partir de ese instante, será incapaz de neutralizar la rotación continuada que implica una proyección de cadera.

Nuestro tirón posee un objeto adicional, que es doblar el cuerpo del contrario de forma que su centro de masa se le adelante hasta el ombligo, o justo fuera del cuerpo. Esta nueva posición nos facilita después el hacer girar el cuerpo del contrario sobre nuestra cadera derecha. Efectuado el contacto entre ambos cuerpos, en nuestra cadera se establece un nuevo centro de giro y la fuerza de tracción crea un nuevo momento de giro sobre el contrario, el cual provoca la rotación de éste sobre nuestra cadera. Como antes, el momento de giro se calcula multiplicando la fuerza que actúa sobre el contrario por el brazo de palanca que va desde la recta de la fuerza al centro de giro. Esta vez la fuerza es el tirón y el centro de giro es la cadera propia. Resulta así que, en la proyección de cadera, se originan dos momentos de giro que actúan sobre el contrario, uno de ellos debido a su propio peso y postura inestable y el otro debido directamente a la tracción que le ejercemos. La llave comienza con el primer momento de giro con el fin de que podamos establecer el segundo sin que él ofrezca resistencia.

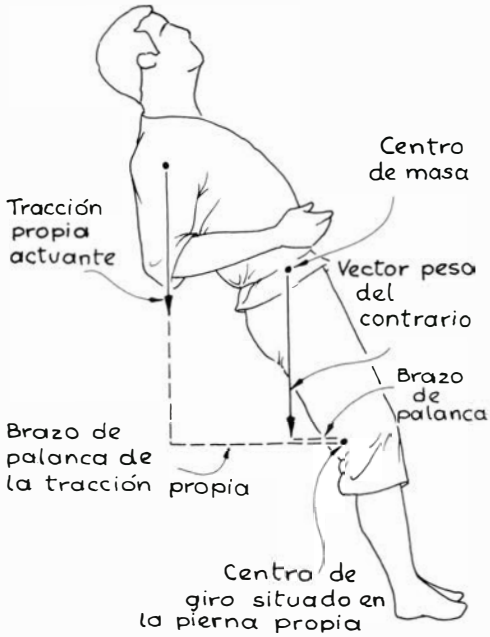
Supongamos que no doblamos el cuerpo del contrario y que, por tanto, su centro de masa no queda fuera del ombligo. Entonces, cuando intentáramos hacer girar su cuerpo sobre nuestra cadera, habría en realidad un momento de giro producido por su peso que contrarrestaría el momento de giro

Pérdida del equilibrio a causa del peso

Fuerzas actuantes en la proyección

Proyección de cadera incorrecta

«Siega externa mayor»



Fuerzas que intervienen en la proyección

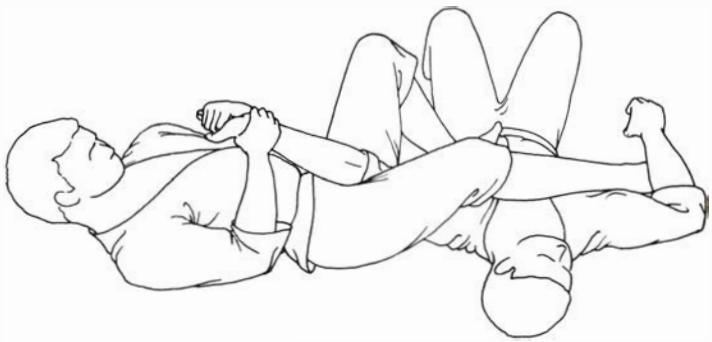
producido por nuestro tirón. Supongamos que siga erguido cuando establecemos contacto con su cuerpo y tratamos de hacerle girar sobre nuestra cadera. El punto de apoyo de la rotación es la cadera propia; vamos a utilizarla para determinar los brazos de palanca de los dos momentos de giro que en ese instante actúan sobre el contrario.

Uno de los momentos de giro es el producto de nuestro esfuerzo de tracción por el brazo de palanca que va desde nuestra cadera a la recta que contiene al vector que representa dicho esfuerzo de tracción. El otro momento de giro es el producto del peso del contrario por el brazo de palanca que va desde nuestra cadera a la vertical que pasa por su centro de masa. Si el contrario permanece erguido, el momento de giro producido por su peso se opone al momento de giro que nosotros le aplicamos, ya que tiende a hacerlo girar sobre nuestra cadera en sentido contrario. Entonces, para finalizar la llave, debemos vencer el momento de giro debido a su peso, pero el tiempo necesario para ello destruirá la ventaja de la sorpresa. Y lo que es más, deberemos entrar en una prueba de fuerza con el contrario.

Cuando la proyección de cadera se ejecuta correctamente, el cuerpo del contrario se dobla formando una curva y su centro de masa se traslada delante de su ombligo, de manera que el brazo de palanca asociado a su peso disminuye o desaparece. Con ello decrece el momento de giro debido a su peso y podemos hacer girar su cuerpo sobre nuestra cadera derecha con relativa facilidad. Esta llave es más eficaz contra un contrincante más alto, dado que podemos tirar de él hacia abajo para encorvarlo adecuadamente con mayor facilidad que si se tratara de un contrario de estatura igual o menor que la nuestra. Además, es mucho más sencillo introducir la cadera bajo un contrario de mayor estatura y también será mayor el brazo de palanca del tirón sobre su vestimenta, produciéndose así un momento de giro mayor para llevarlo a nuestra cadera.

La llave llamada "siega externa mayor" (en japonés *osotogari*) se entiende algo mejor en base a los movimientos de rotación. Cuando el contrario retrasa el pie izquierdo, nosotros adelantamos el pie izquierdo colocándolo por la parte exterior de su pie derecho a la vez que tiramos hacia abajo de su vestimenta, de forma que obligamos a que su peso descanse sobre dicho pie. Además, el tirón debe efectuarse en dirección a su retaguardia y hacia su derecha para que se curve hacia atrás. Así ya le habremos llevado a una posición inestable, puesto que habremos desplazado su centro de masa hacia la derecha de su retaguardia separándolo de la superficie de apoyo delimitada por los pies. No le es posible escabullirse deslizando el pie hacia la derecha y recobrando el equilibrio, puesto que ya le hemos forzado hacia abajo. Su inestabilidad resulta del momento de giro creado por el peso respecto a un centro de giro situado en sus pies, primordialmente el derecho. El brazo de palanca va desde este centro de giro a la recta definida por el vector de su peso. Situado en esta posición ya lo tenemos preparado para aplicarle la segunda parte de la llave,

Barrido de tobillo



Ejecución de una presa de brazo en cruz

en la que eliminaremos aún más su superficie de apoyo y le aplicaremos un segundo momento de giro que lo llevará rápidamente a la colchoneta.

Continuamos la llave adelantando el pie derecho por detrás y alrededor del pie derecho del contrario. Seguidamente, llevamos la cadera y pierna derechas hacia nuestra retaguardia a la vez que forzamos su costado derecho hacia la derecha de su retaguardia, dejándole prácticamente sin base de apoyo. Los dos momentos de giro le harán girar en torno a un punto situado en nuestra pierna derecha y, aun cuando no siguiéramos empujándolo después de barrerle la pierna, él girará en torno de nuestra pierna dado que la gravedad atraerá su centro de masa; en realidad, nuestro empujón hacia abajo sirve para acelerar su caída. En esta llave los dos momentos de giro se complementan entre sí.

En el "barrido de tobillo" (*okuriashi bari*) se elimina el apoyo del contrario sobre una de sus piernas de una manera similar. En el momento en que éste se dispone a descansar su peso sobre el pie derecho en el transcurso de un paso adelante o atrás, llevamos nuestro pie izquierdo a un punto de dicha pierna situado justo encima del tobillo. Simultáneamente, tiramos de su vestimenta en la dirección de su desplazamiento original. Supongamos que estaba moviéndose hacia adelante. Entonces tiramos hacia adelante (y así no encontraremos resistencia) a la vez que barremos su pie derecho hacia su pie izquierdo. Así, aun cuando consiga mantener el pie izquierdo sobre la colchoneta, su superficie de apoyo se habrá reducido notablemente y la habremos desplazado de por debajo de su centro de masa, con lo que su peso producirá un mo-

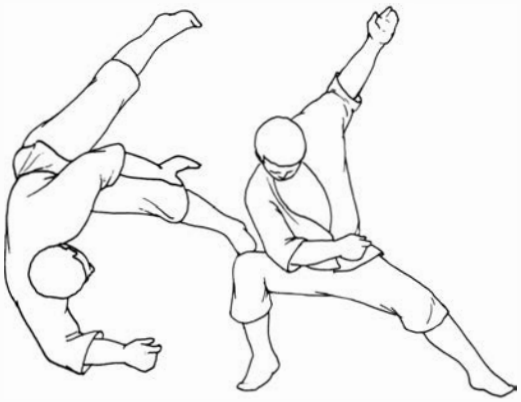
Movimiento de aikido para eludir un intento de apresamiento de las muñecas desde atrás

Defensa contra un golpe de canto de mano

Defensa contra un intento de apresamiento de los brazos desde atrás

mento de giro que lo llevará a la colchoneta. Si además inclinamos el cuerpo a la vez que mantenemos el tirón sobre su vestimenta, habremos desarrollado otro momento de giro que lo hará girar hacia la colchoneta. El centro de giro es aquí su pie izquierdo y vuelve a ocurrir que los dos momentos de giro se complementan entre sí.

En las clases superiores de judo se enseñan procedimientos para poner fuera de combate a un contrincante sobre la colchoneta ("técnicas en el suelo"). Estas "inmovilizaciones" implican en su mayoría el apresamiento del contrario sobre la colchoneta, con el peso propio aplicado de tal forma que le sea imposible darse la vuelta o levantarse, aun cuando sea más fuerte. Por ejemplo, en la "presa de brazo en cruz" (*udehishigi-jujigatame*) la posición propia es tal que parte de nuestro peso actúa sobre el torso del contrario, que se encuentra en el suelo y en tal situación que no sólo le es imposible levantarse, sino que además es probable que ni siquiera intente moverse por temor a partirse el brazo.



El movimiento se origina estando nosotros a horcajadas junto al costado del contrario, quien se encuentra postrado boca arriba. Cuando éste levanta el brazo izquierdo con el ánimo de prevenir nuestro ataque, le sujetamos la muñeca con ambas manos, nos dejamos caer a su lado, proyectamos la pierna derecha sobre su cuello y con la rodilla izquierda alzada lanzamos el tobillo izquierdo contra su costado. Así tendremos su brazo izquierdo con el codo hacia abajo apresado entre nuestras piernas. Entonces, incluso un leve empuje hacia abajo sobre su muñeca creará un enorme momento de giro sobre su brazo en torno al punto en que éste se cruza con nuestra pierna derecha, punto que es el centro de giro. No podrá sentarse ya que nuestro peso creará sobre él un momento de giro abrumador cuando intente hacer rotar el tronco en torno a un centro de giro situado a la altura de sus caderas. Tampoco podrá liberar su brazo izquierdo aun cuando sea considerablemente más fuerte que nosotros. Podría tratar de contrarrestar la acción del momento de giro que le aplicamos a su brazo utilizando los músculos de los hombros, pero éstos actuarían sobre un punto de su brazo muy cercano al centro de giro, con lo que dispondrían de un brazo de palanca muy corto. Como en la mayoría de las técnicas de judo, una persona adiestrada para crear los momentos de giro adecuados sobre un contrincante goza de una ventaja enorme, por más que aquél sea mucho más fuerte.

El aikido es una forma de arte marcial relativamente moderna en la que se reúnen técnicas tomadas de muchas de las otras. Su rasgo más característico es la estricta norma de evitar toda lesión al contrario. Por ello, más que un deporte de competición es una forma de autodefensa en la que no intervienen técnicas que puedan considerarse ataques. Por mi parte opino que es la más difícil de aprender de todas las artes marciales, pues sus exigencias de destreza, desenvoltura y coordinación rivalizan con las del ballet.

En el aikido se emplean en gran parte los mismos principios de mecánica que se encuentran en el judo. Supongamos que el contrario nos sujeta las muñecas desde atrás. En uno de los movimientos del aikido hacemos descender suavemente nuestro cuerpo a la vez que elevamos las muñecas por encima de la cabeza y hacia adelante. El contrario no habrá soltado nuestras muñecas pero al descender le habremos desplazado e inclinado ligeramente hacia adelante. Por consiguiente, su posición será inestable ya que su centro de masa se encontrará algo adelantado respecto a sus pies. Rápidamente, entonces, hacemos retroceder la pierna derecha y nos dejamos caer sobre la rodilla derecha, adelantando el torso para formar un arco hacia abajo con éste y los brazos. Como en la primera parte del movimiento se indujo al contrario a sujetar con fuerza nuestras muñecas, ahora le proyectamos hacia adelante por encima de nuestro cuerpo.

Como ocurre casi siempre en el aikido, es nuestro contrario quien en realidad se proyecta a sí mismo. El no puede impedir nuestro movimiento hacia adelante a causa de la postura inestable en que le colocamos al principio y, aunque su peso sea mayor, no podrá detenerlo tirando hacia abajo de nuestras muñecas ya que, en una postura como la suya, sólo podrá tirar a lo largo de nuestros brazos en cuyo caso el momento de giro de su tirón será nulo al no existir brazo de palanca. Recuérdese que el brazo de palanca es la distancia perpendicular desde el centro de giro (nuestro hombro en este caso) hasta la recta sobre la que se encuentra la fuerza y ésta, para el tirón ejercido por nuestro contrario, pasa por nuestro hombro y por tanto carece de brazo de palanca. Así, aunque se trate de una persona pesada o vigorosa, no podrá hacer girar nuestros brazos una vez los hayamos colocado correctamente por encima de la cabeza.

Muchas técnicas del aikido se basan en la desviación de una fuerza dirigida directamente hacia nosotros. Supongamos que el atacante nos lanza un puñetazo al rostro. Para detener un puñetazo de frente se requiere resistir una gran fuerza de impacto, quizá superior a 3000 newton, que probablemente produzca rotura de huesos. Un procedimiento más prudente es desviar el golpe ya que, aunque para pararlo de frente sea necesaria una fuerza elevada, para desviarlo basta una fuerza reducida. Así, una fuerza de 10 newton puede ser suficiente para desviar un centímetro un golpe directo.

Si bien la mayoría de los partidarios de los estilos de lucha occidentales consideran que el ataque es una ventaja, en el aikido el atacante se encuentra en inferioridad manifiesta a causa del impulso de su propio golpe, puesto que este impulso se emplea para derribarlo. Supongamos que el atacante comienza adelantándose con el pie derecho y lanzándonos un golpe a la cara con el canto de la mano derecha (ataque típico tanto de los estilos de lucha occidentales como del kárate). Entonces, retrasamos el pie derecho a la vez que evadimos el golpe con el brazo izquierdo. Con esto buscamos desviar el golpe, no pararlo y ni siquiera frenarlo, ya que cualquiera de ambas cosas requeriría de nosotros una fuerza considerable. Durante este movimiento se guía el brazo derecho del atacante hacia abajo hasta asirlo con nuestra mano derecha y, mientras seguimos sin oponernos a su impulso hacia adelante, tiramos de él en redondo aprovechando el movimiento de rotación que hemos iniciado al retirar hacia atrás nuestra pierna izquierda. Al mantener adelantado el pie derecho, nuestro atacante se encontraba en una posición relativamente estable frente a una tracción directamente hacia adelante, pero será muy inestable frente a una tracción ejercida hacia adelante y hacia su izquierda, ya que en esta dirección no tendremos que desplazar mucho su centro de masa para que éste se haga inestable y caiga. Por tanto, a la vez que seguimos girando, tiramos de él en tal dirección. Ahora lo tendremos en una situación gravemente desfavorable por dos motivos. Primero, ha adquirido un movimiento hacia adelante cuya detención exigiría una fuerza considerable, incluso de él mismo. Segundo, nuestro tirón y su movimiento están haciendo salir su centro de masa fuera de su base de apoyo.

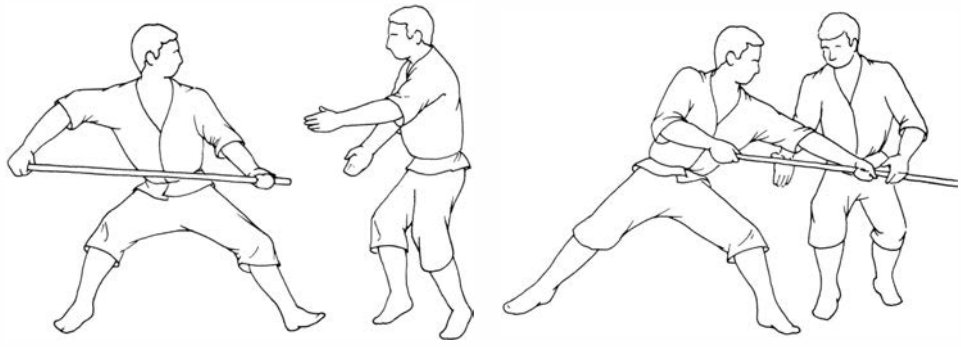
Para terminar la proyección hacemos girar hacia abajo el brazo derecho de nuestro atacante a la vez que retrocedemos hacia la izquierda de nuestra retaguardia, le retorcemos la muñeca de arriba abajo y le doblamos la mano sobre ella. En este punto ya le será imposible impedir ser derribado, pues habrá perdido el equilibrio y será totalmente incapaz de detener su propio movimiento. Además, tampoco podrá desasirse de nuestro agarrón porque le hemos doblado el brazo a la altura de la muñeca y, por muy fuertes que sean sus brazos, no podrá evitar el momento de giro que le hemos creado al empujarle la mano en torno a su propia muñeca. O sea, que caerá sobre la colchoneta.

¿Cómo se hace frente a un golpe a la cabeza de esta naturaleza en el kárate? En el *tae-kwon-do*, kárate de estilo coreano, me enseñaron a neutralizar los golpes de canto de mano mediante un golpe fuerte de través en el brazo del contrincante. Aquí era importante la desviación del golpe, pero tanto como ello lo era contrarrestar el golpe con una fuerza grande. Así pues, a una fuerza se le enfrentaba otra fuerza y habitualmente ganaba el más robusto. (Rara vez era yo este último.)

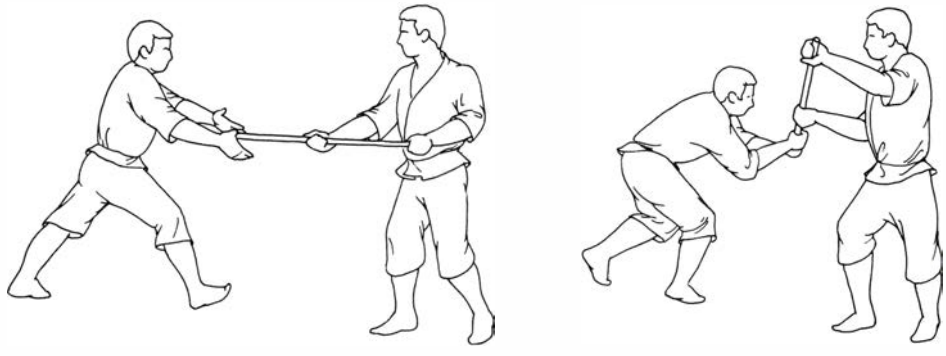
En el aikido el movimiento circular se emplea a la vez para desviar el golpe y para hacer perder el equilibrio al contrario. Supongamos que alguien se nos acerca por detrás, asiéndonos alrededor del cuerpo y aprisionándonos los brazos contra los costados. Entonces, ofreciendo resistencia hacia arriba le mantenemos las manos apretadas firmemente contra nuestro pecho y adelantamos un pie. La coordinación es crítica ya que nuestra intención es desplazar el torso hacia adelante a una velocidad comparable a la del contrario. Si nos retrasamos, perderemos la ventaja de aprovecharnos de su impulso; si nos movemos demasiado rápido, habremos de arrastrarle hacia adelante. Lo que hemos de hacer es deslizar hacia adelante el pie derecho con la celeridad conveniente y después inclinarnos de repente hacia adelante y hacer girar el cuerpo a la derecha.

Combinando el impulso inicial del contrario con una rotación propia muy rápida conseguiremos lanzarlo despedido hacia la derecha. En efecto, como nuestra inclinación hacia adelante habrá desplazado su centro de masa por delante de los pies no le será posible evitar nuestro movimiento; como le hemos sujetado las manos y él nos tiene asidos alrededor de los brazos, no le será posible liberarse del movimiento hacia adelante establecido a consecuencia de su impulso. Entonces, la fuerza centrífuga actuante sobre él durante nuestra rápida rotación será excesiva para que pueda aguantarla, considerado lo inestable de su posición, y, por ello, ineludiblemente dará contra el suelo.

En dos ejemplos más de cómo en el aikido se emplea una fuerza pequeña para hacer perder el equilibrio a un atacante aparece la lucha con bastones, tal como se enseña en las clases superiores. Supongamos que un atacante nos lanza un golpe de bastón dirigido al centro de nuestro cuerpo, avanzando su pie derecho durante la acometida y blandiendo el bastón horizontalmente, sosteniéndolo con las palmas de ambas manos hacia abajo. Sería vano tratar de



Cómo luchar co



Cómo actuar cu

atacar contra un atacante que embiste con un bastón

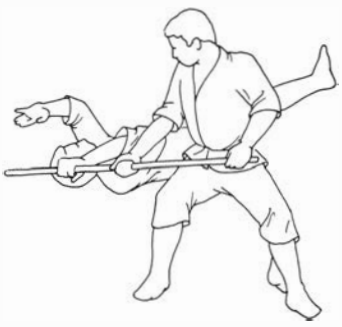
detener el bastón por el extremo. Lo que haremos es dar un paso atrás con el pie derecho de forma que el bastón pase junto a nuestra izquierda. (La agilidad para ello tan sólo puede proceder de una larga práctica.) Luego, a la vez que el bastón pasa, giramos nuestro cuerpo para quedar frente al mismo y de forma que podamos asirlo con ambas manos. Estas deben situarse de tal manera que la mano izquierda quede delante de la mano más adelantada del atacante y la mano derecha entre las dos manos del atacante.

Al asir el bastón, nuestro propósito no es detener su movimiento, lo que exigiría una fuerza considerable. En lugar de ello lo que se pretende es desviar el bastonazo hacia arriba, haciéndole describir un círculo en torno a nuestra izquierda y después hacia arriba y sobre la cabeza del atacante, pues una vez que éste se ha enzarzado en la acometida hacia adelante poco podrá hacer para evitar la desviación. Efectivamente, para detener su impulso el atacante necesitaría una fuerza considerable y no podrá lanzar un golpe horizontal al centro de nuestro cuerpo mientras tira hacia abajo para impedir nuestra acción de desviación.

Una vez el bastón por encima de la cabeza del atacante, a éste se le derriba fácilmente. Con el pie izquierdo adelantado se encontrará en una posición de gran inestabilidad frente a toda tracción que se le ejerza hacia la izquierda de su retaguardia, ya que en tal dirección su centro de masa tan sólo necesita desplazarse una corta distancia para encontrarse fuera de la superficie de apoyo. Cuando el bastón esté encima de su cabeza, tiraremos hacia abajo y hacia su espalda en dicha dirección, con lo que caerá sobre la colchoneta y probablemente suelte el bastón.

Supongamos ahora que nosotros tenemos el bastón y que un atacante determinado se abalanza hacia adelante para asirlo por su extremo exterior. Le dejaremos que lo agarre, pero guiándole (como una zanahoria delante de un asno) de forma que continúe su embestida. Además alzaremos nuestro extremo del bastón para engañarle y conseguir que se doble hacia adelante. Una vez que le tengamos entregado a este torpe movimiento y esté a punto de pasar por nuestra derecha, levantaremos nuestro extremo del bastón a la altura de su cara y después lo haremos descender hacia su espalda. Si este movimiento se ejecuta con rapidez, le sorprenderemos cuando todavía tiene asido con fuerza el bastón y, por tanto, se doblará hacia atrás a causa de nuestra tracción hacia su espalda y del movimiento continuado de su cuerpo hacia adelante. Así, el momento de giro producido por su propio cuerpo lo hará girar en dirección al suelo en torno a un centro situado a sus pies. Además, la fuerza que ejerce al asir el bastón nos proporciona otro momento de giro para hacerlo girar. De hecho, será él mismo quien provoque su derribo sobre la colchoneta, a causa de su embestida inicial hacia adelante y de un poco de maña por nuestra parte al desestabilizarlo.

El aikido posee centenares de técnicas para utilizar mañosidades como éstas frente a un contrincante determinado. En casi todas ellas una pequeña fuerza de desviación sirve para evitar la acometida del contrario y guiarle de forma que sea él quien se derribe a sí mismo. Siempre que contemplo una defensa de un maestro de aikido, los movimientos me parecen tan fluidos y sin esfuerzos que me veo inclinado a sospechar que el contrario finge cuando cae al suelo. Pero la caída no es simulada; lo parece porque el maestro ha invertido años en desarrollar una sensibilidad intuitiva acerca de las leyes físicas relativas a las fuerzas, los movimientos de rotación y los momentos de giro.



actuar cuando el contrario intenta asir el bastón propio

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA TRADUCCION DE LOS LENGUAJES DE COMPUTADOR

COMPILER CONSTRUCTION. AN ADVANCED COURSE. Dirigido por G. Goos y J. Hartmanis. Springer-Verlag, 1974.

APL-AN INTERACTIVE APPROACH. Leonard Gilman y Allen J. Rose. John Wiley and Sons, Inc., 1974.

IL. AN INTERMEDIATE SYSTEMS PROGRAMMING LANGUAGE. María Luisa Tavera y Manuel Alfonseca. Publicación del Centro de Investigación UAM-IBM n.º SCR 01-78; mayo, 1978.

A MACHINE INDEPENDENT APL INTERPRETER. Manuel Alfonseca y María Luisa Tavera en *IBM Journal of Research and Development,* vol. 22, n.º 4, págs. 413-421; julio, 1978.

LUPUS ERITEMATOSO SISTEMICO

IMMUNOPATHOGENESIS OF SYSTEMIC LUPUS ERITHEMATOSIS. David Koffler en *Annual Review of Medicine,* vol. 25, págs. 149-164; 1974.

THE IMMUNOLOGIC APPROACH TO SYSTEMIC LUPUS ERYTHEMATOSUS. H. G. Kunkel en *Arthritis and Rheumatism,* vol. 20, págs. S139-S147; 1977.

RHEUMATOID DISEASES. Ken Fye, Haralampos Moutsopoulos y Norman Talal en *Basic and Clinical Immunology,* dirigido por H. Hugh Fudenberg, D. P. Stites, J. L. Caldwell y J. V. Wells. Lange Medical Publications, 1978.

RECENT PROGRESS IN THE STUDY OF AUTOANTIBODIES TO NUCLEAR ANTIGENS. R. M. Nakamura y E. M. Tan en *Human Pathology,* vol. 9, n.º 1, págs. 85-91; enero, 1978.

THE IMMUNOLOGY OF RHEUMATOID DISEASES. David Koffler en *CIBA Clinical Symposia,* vol. 31, n.º 4; 1979.

ASTRONOMIA DE LINEAS DE RAYOS GAMMA

GAMMA-RAY ASTRONOMY. E. L. Chupp. D. Reidel Publishing Co., 1976.

EVIDENCE FOR STRONG CYCLOTRON EMISSION IN THE HARD X-RAY SPECTRUM OF HERCULES X-1. J. Trümper, W. Pietsch, C. Reppin, W. Voges, R. Staubert y E. Kendziorra en *The Astrophysical Journal Letters,* vol. 219, n.º 3, parte 2, págs. L105-L110; 1 de febrero de 1978.

GAMMA-RAY LINES: A NEW WINDOW TO THE UNIVERSE. Richard E. Lingenfelter y Reuven Ramaty en *Physics Today,* vol. 31, n.º 3, págs. 40-47; marzo, 1978

MONUMENTOS MEGALITICOS

STONEHENGE, R. J. C. Atkinson. Macmillan and Company, 1956.

THE MEGALITH BUILDERS OF WESTERN EUROPE. Glyn L. Daniel. Praeger Publishers, 1958.

BRITTANY. P. R. Giot. Praeger Publishers, 1960.

ANCIENT EUROPE FROM THE BEGINNINGS OF AGRICULTURE TO CLASSICAL ANTIQUITY. Stuart Piggott. Edinburgh University Press, 1965.

BEFORE CIVILIZATION: THE RADIOCARBON REVOLUTION AND PREHISTORIC EUROPE. Colin Renfrew. Alfred A. Knopf, Inc., 1973.

CONVECCION

HYDRODYNAMIC AND HYDROMAGNETIC STABILITY. S. Chandrasekhar. Oxford University Press, 1961.

BUOYANCY EFFECTS IN FLUIDS. J. S. Turner. Cambridge University Press, 1973.

CONVECTIVE INSTABILITY: A PHYSICIST'S APPROACH. Christiane Normand, Yves Pomeau y Manuel G. Velarde en *Reviews of Moderns Physics,* vol. 49, n.º 3, págs. 581-624; julio, 1977.

TALLER Y LABORATORIO. Jearl Walker en *Investigación y Ciencia,* n.º 15, págs. 116-121; diciembre, 1977.

FISIOLOGIA DEL KOALA

THE KOALA: PROCEEDINGS OF THE TARONGA SYMPOSIUM ON KOALA BIOLOGY, MANAGEMENT, AND MEDICINE. Dirigido por T. J. Bergin. Zoological Parks Board of N.S.W., 1978.

METABOLISM AND HEAT BALANCE IN AN ARBOREAL MARSUPIAL, THE KOALA (*PHASCOLARCTOS CINEREUS*). Robert Degabriele y T. J. Dawson en *Journal of Comparative Physiology.* vol. 134, págs. 293-301; 1979

ADN SUPERENROLLADO

STRUCTURE AND REACTIONS OF CLOSED DUPLEX DNA. William R. Bauer en *Annual Review of Biophysics and Bioengineering,* vol. 7, págs. 287-313; 1978.

DNA TOPOISOMERASES: ENZYMES THAT CATALYZE THE CONCERTED BREAKING AND REJOINING OF DNA BACKBONE BONDS. James C. Wang en *Molecular Genetics,* dirigido por J. Herbert Taylor. Academic Press, 1979.

IS DNA REALLY A DOUBLE HELIX? F. H. C. Crick J. C. Wang y W. R. Bauer en *Journal of Molecular Biology,* vol. 129, n.º 3, págs. 449-457; 15 de abril de 1979.

DNA GYRASE AND THE SUPERCOILING OF DNA. Nicolas R. Cozzarelli en *Science.* vol. 207, n.º 4434, págs. 953-960; 29 de febrero de 1980.

LA HELICE

AIRPLANE PROPELLERS. Herman Glauert en *Aerodynamic Theory,* dirigido por William Frederick Durand. Springer-Verlag, 1934-36.

AERODYNAMICS: SELECTED TOPICS IN LIGHT OF THEIR HISTORICAL DEVELOPMENT. Theodore Von Kármán. Cornell University Press, 1954.

MARINE HYDRODYNAMICS. J. N. Newman. The MIT Press, 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

AN EPISODE OF FLATLAND. C. H. Hinton. Swan Sonnenschein & Co., 1907.

PLANILANDIA. E. A. Abbott. Ediciones Guadarrama. Madrid, 1976.

SPHERELAND: A FANTASY ABOUT CURVED SPACES AND AN EXPANDING UNIVERSE. Thomas Y. Crowell, 1965.

TALLER Y LABORATORIO

JUDO ON THE GROUND. E. J. Harrison, W. Foulsham & Co., 1954.

AIKIDO AND THE DYNAMIC SPHERE: AN ILLUSTRATED INTRODUCTION. A. Westbrook y O. Ratti. Charles E. Tuttle Company, 1970.

ADVANCED TECHNIQUES. Morihiro Saito en *Traditional Aikido: Sword, Stick and Body Arts.* Minato Research & Publishing Co., 1973-74.

Taller y laboratorio

Deslumbrantes exhibiciones con láser, en las que se vierte luz sobre luz

Jearl Walker

Puede decirse que el "laser art" nació casi a la vez que el propio láser. El láser es un ingenio que emite luz coherente, razón por la cual puede emplearse para hacer demostraciones de efectos interferenciales verdaderamente deslumbrantes, que constituyen unos espectáculos visuales imposibles de conseguir con lámparas ordinarias. Este mes voy a describirles algunos de los artificios que empleo en mis demostraciones con transparencias en la Universidad estatal de Cleveland.

En cada una de las demostraciones, 10 proyectores arrojan simultáneamente la imagen de cinco transparencias sobre pantallas que ocupan paredes enteras. Todas estas imágenes se sincronizan con música. Durante determinadas partes de cada demostración, los proyectores quedan en blanco y no proyectan imágenes; en lugar de ello, se ponen en acción dos láseres de hélio-neón de 15 miliwatt que se dirigen a través de un dispositivo óptico para crear en las pantallas imágenes de figuras de interferencia y curvas de Lissajous. Inmediatamente antes de que los láseres entren en juego, se producen cuatro explosiones delante de las pantallas. Entonces, cuando los haces de los láseres atraviesan el humo, las trayectorias descritas por la luz por encima del público destellan brillantemente, dando casi la impresión de que los estrechos haces de un rojo brillante no son reales.

Los procedimientos que voy a exponer son de dos clases, uno de ellos basado en la interferencia de las ondas luminosas y el otro en la modificación de la trayectoria del haz de un láser mediante una oscilación mecánica. Los procedimientos basados en la interferencia han sido elaborados por David Yoel, estudiante de Cleveland, con quien estoy en deuda por sus esfuerzos. La dispersión que dan las rejillas de que dispongo es de calidad media.

Las rejillas se fabrican de plástico transparente sobre el que se prepara el reticulado por métodos no revelados. Una de las rejillas produce una figura de difracción del tipo que suele verse en las clases de física elemental: cuando la rejilla se introduce en el haz de un láser, en la pantalla se proyecta una hilera de puntos brillantes. Una segunda rejilla crea un racimo de puntos brillantes rodeados de otros más apagados. Una tercera crea un racimo parecido, pero con la diferencia de que los puntos brillantes están dispuestos rectangularmente.

Un cuarto tipo de filtro está construido a base de trozos del primer tipo de rejilla cortados en forma de gajos o trozos de tarta y dispuestos con las puntas agrupadas en el centro. Cuando este filtro se coloca dentro de un haz de láser ensanchado, los trozos producen una hilera de puntos cada uno y, como hay 48 trozos, aparecen 48 hileras de puntos brillantes que se extienden radialmente hacia el exterior partiendo del centro de la imagen.

El despliegue, impresionante, queda eclipsado por la figura que arroja el quinto filtro. Este crea la ilusión de una bolita de árbol navideño de un rojo brillante. En el centro de la figura aparece un punto luminoso, que despide un gran resplandor, alrededor del cual hay un círculo de puntos brillantes. A ambos lados de este círculo aparecen puntos rojos dispuestos de tal manera que producen la ilusión de la superficie de una bolita.

Todas las rejillas actúan aprovechando la interferencia ondulatoria de la luz, en especial, la difracción. El caso más simple de difracción lo ofrece la luz cuando atraviesa una pequeña rendija practicada en un filtro opaco. Esta rendija ha de ser muy larga y estrecha, de una anchura, digamos, de unos pocos micrometros. En realidad, lo que se persigue es que la anchura sea próxima a la longitud de onda de la luz que ha de atravesar la rendija. Con una apertura de esta clase, la luz se difracta, o sea, se esparce o propaga a lo largo de una recta paralela a la anchura de la rendija y, por ello, la luz que atraviesa la rendija no prosigue su propagación totalmente en su dirección inicial. En lugar de ello se extiende hacia los lados.

A la luz le ocurre algo más, y es que no se propaga uniformemente hacia los lados, sino que para determinados ángulos es más intensa, y para otros ángulos es menos intensa e incluso desaparece. Si esta luz se recoge en una pantalla, en ésta se puede observar una figura de rayas brillantes y oscuras (habitualmente llamadas franjas). La figura de difracción (tanto en lo que respecta a la propagación de la luz como a las rayas brillantes y oscuras) se debe a la interferencia de las ondas luminosas que atraviesan la abertura.

En la construcción matemática del fenómeno de las interferencias imaginamos que el frente de onda que en cualquier instante se encuentra en la rendija está compuesto de una serie de diminutos generadores de ondas, cada uno de los cuales emite una onda semicircular. Si hay un número muy grande de generadores, uno junto a otro, las ondas semicirculares se interferirán entre sí al expandirse, creando otro frente de ondas plano desplazado lateralmente respecto al inicial. Este nuevo frente de ondas tendrá también un número infinito de los generadores en cuestión, cada uno de los cuales emitirá su onda semicircular. Estas ondas semicirculares volverán a interferirse entre sí y a crear otro frente de ondas plano, desplazado respecto al precedente. Con este modelo es posible describir matemáticamente cómo se desplaza un frente de ondas.

Aunque tales generadores de ondas sean imaginarios (al menos no existen pruebas concluyentes de que la naturaleza actúe auténticamente de esa forma), la utilización de la composición de interferencias de diminutos generadores de ondas semicirculares como modelo de onda luminosa permite predecir los resultados de multitud de experimentos de óptica y, en particular, predecir la figura proyectada por una rendija estrecha iluminada con luz láser. Aquí, cuando una onda atraviesa la rendija, a cada lado de los generadores de ondas situados en la rendija ya no hay un número infinito de generadores. Este número era infinito antes de que el frente de ondas llegase a la rendija, pero la pantalla opaca elimina el resto de los generadores.

Con todo, los generadores que sí entraron en la rendija emitirán todos su

acostumbrada onda semicircular, pero con la diferencia, muy importante, de que el número de ondas semicirculares será ahora demasiado reducido para que su interferencia reconstruya el frente de ondas plano que llegó a la rendija. Parte de las ondas semicirculares se propagarán hacia los lados en vez de seguir derechas en la dirección perpendicular al filtro. Además, para ciertos ángulos respecto a la dirección de avance, la onda producida por alguno de los generadores estará exactamente en oposición de fase con la onda producida por los otros generadores; como resultado, no se emitirá onda luminosa resultante en dicha dirección. Entonces, cuando se interponga una pantalla en el camino de la luz difractada, esta anulación de una onda luminosa dará por resultado una raya negra en la pantalla. En otros lugares las ondas se reforzarán entre sí y producirán una raya brillante en la pantalla.

Una rejilla de difracción, que se compone de muchas rendijas, actúa fundamentalmente de la misma forma, con la salvedad de que la luz difractada a través de cada una de las rendijas interfiere con la luz procedente de todas las demás. En una rejilla de difracción puede haber decenas de miles de rendijas, cuyo efecto en la figura de difracción que se recoge en la pantalla es que las zonas brillantes son más estrechas y nítidas que en la figura que proyecta una rendija única.

Muchas de las rejillas de bajo precio que se encuentran en el mercado son

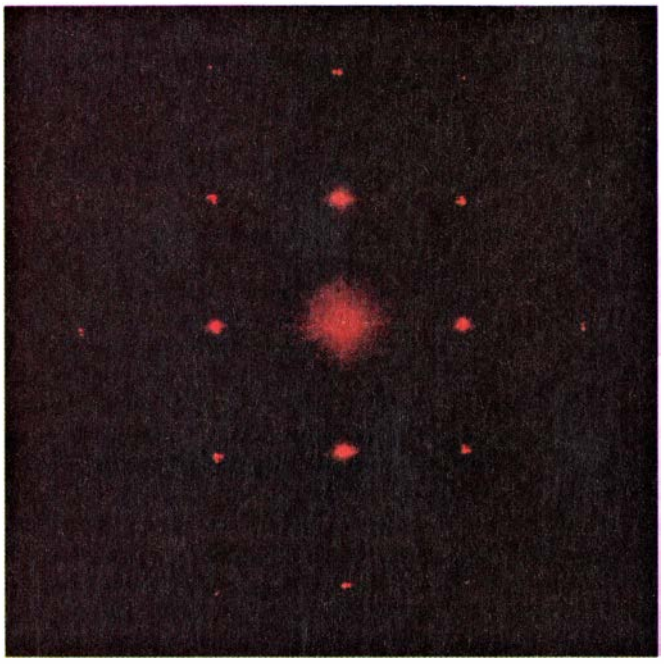
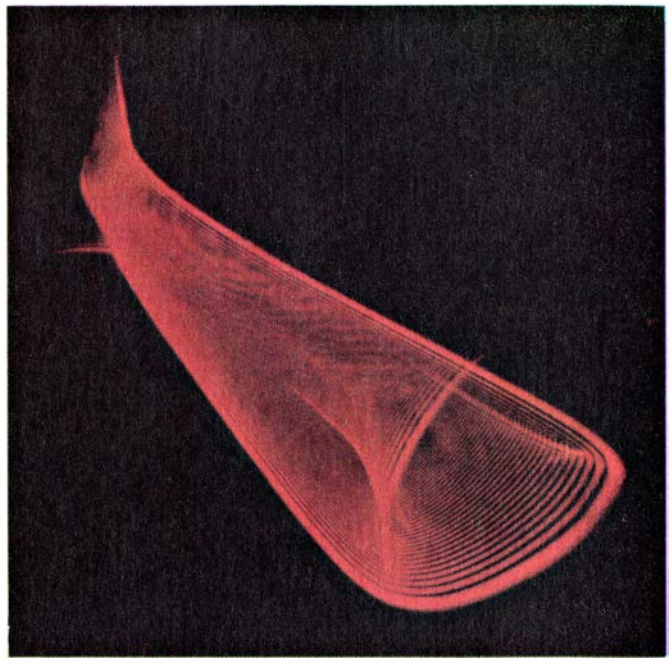


Figura de difracción producida por dos filtros de Ronchi cruzados



Plástico dibujado en el haz

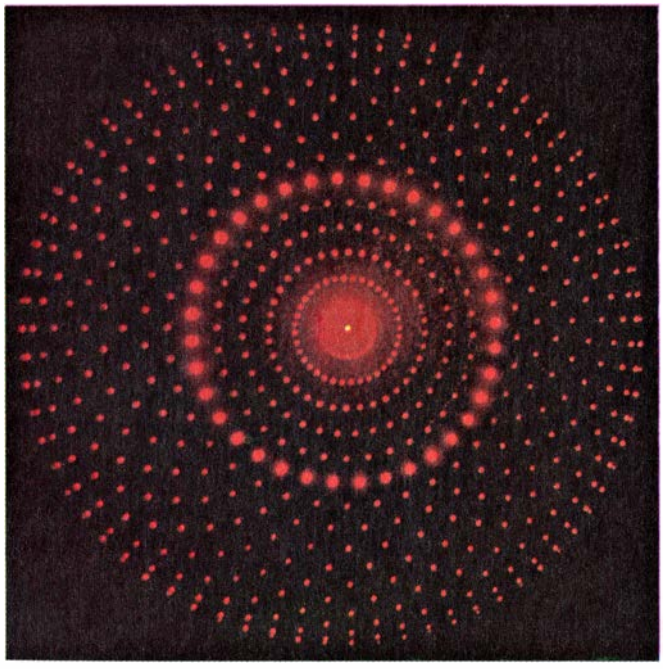
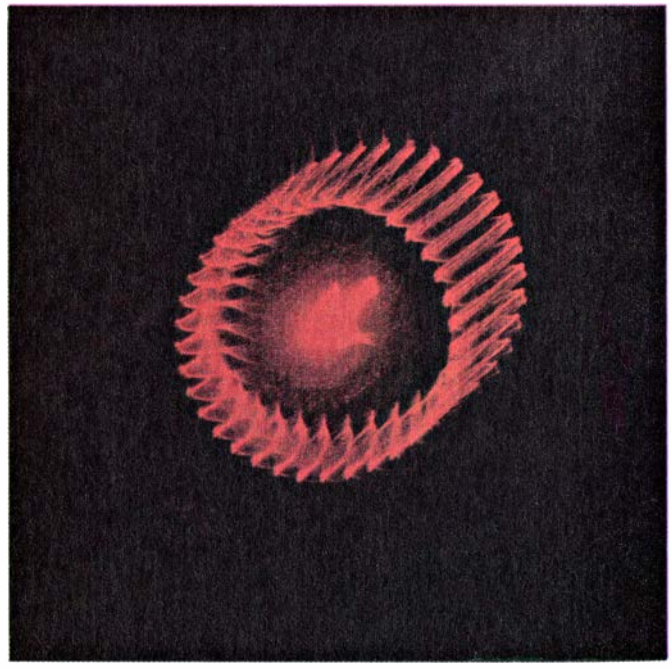


Imagen de la "bola de Navidad"



Rejilla de 48 segmentos combinada con plástico

copias en plástico de una red maestra grabada químicamente sobre vidrio o metal. Examinando una de las redes al microscopio puede detectarse la estructura del reticulado. Las "líneas" son de unos dos micrometros de ancho.

Toda red cuyo reticulado esté formado por rectas de transmisión y opacidad igualmente espaciadas se llama filtro de Ronchi. Estos filtros crean una figura de difracción compuesta de un punto central brillante y otros dos puntos brillantes, uno a cada lado del punto central. A cada lado y más lejos aparecen puntos menos brillantes, y la figura completa se encuentra sobre una recta. Los primeros puntos laterales son casi tan brillantes como el central, pero los demás lo son sensiblemente menos.

Si en un haz de láser se colocan dos filtros de Ronchi de manera que sus "líneas" formen un ángulo recto entre sí, cada filtro producirá su propia figura de difracción. El resultado es la combinación de las dos figuras, con un punto central brillante y ocho puntos algo menos brillantes dispuestos rectangularmente en torno al primero. Se aprecian puntos más pálidos ubicados a mayor distancia del centro.

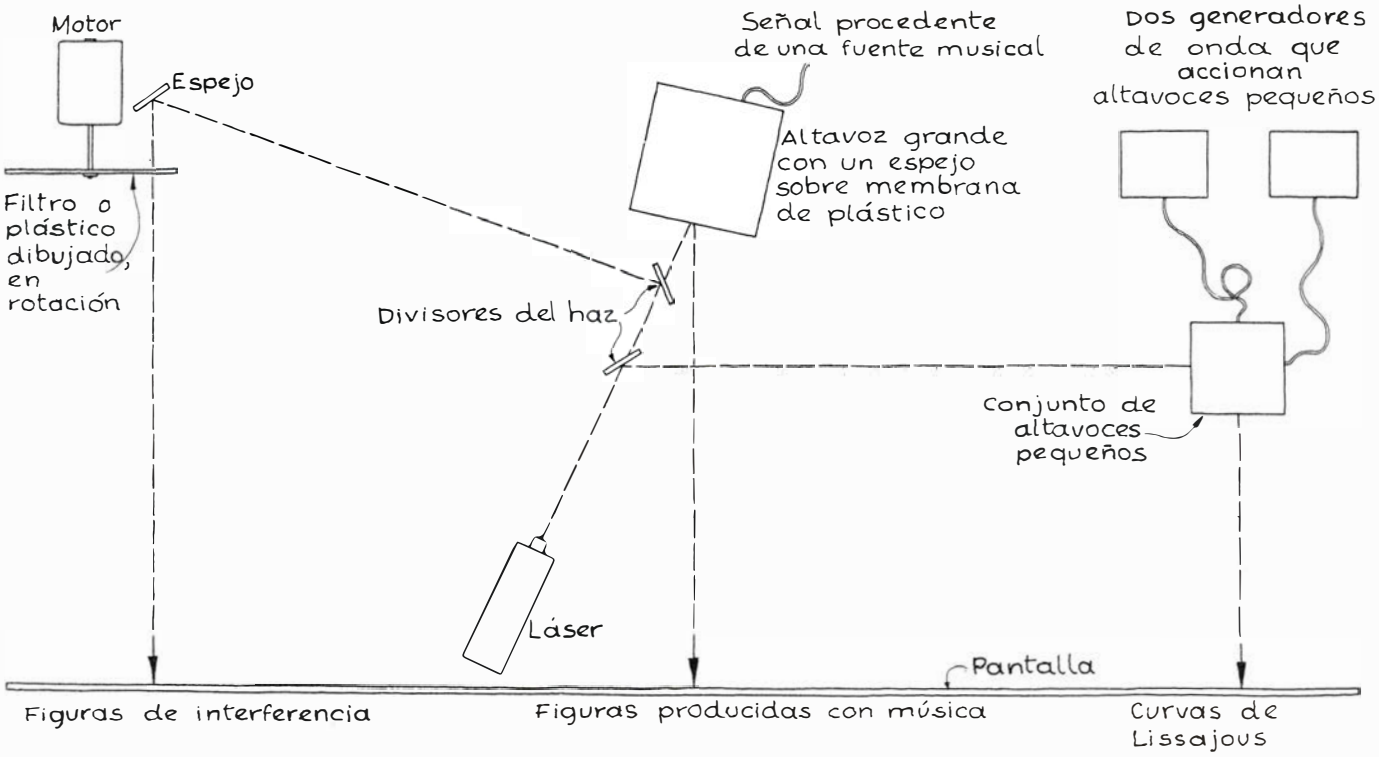
Cruzando más filtros de Ronchi, cada uno de ellos bajo un ángulo distinto respecto al precedente, se crean figuras de difracción progresivamente más complicadas. En todos los casos aparece un punto central brillante rodeado de un conjunto ordenado de puntos secundarios ligeramente más apagados. Además, toda la imagen se manifiesta ocupada por puntos sensiblemente menos brillantes correspondientes a órdenes de interferencia superiores.

En apariencia, el filtro de la bola navideña se compone esencialmente de dos o tres filtros de Ronchi cruzados, alguno de los cuales presenta una separación variable entre rayas. Este filtro no es simplemente el resultado de pegar entre sí tres o cuatro filtros de Ronchi corrientes. Se ha dado con un procedimiento para cruzar filtros de Ronchi sobre una sola superficie conformando adecuadamente las porciones realzadas de la misma. Al examinar este filtro al microscopio, observé un conjunto de protuberancias hexagonales dispuestas linealmente, de tal forma que el conjunto de hileras de protuberancias paralelas actuaba como un filtro de Ronchi. Una recta perpendicular a estas hileras puede designarse como eje n.º 1. Otro filtro (de eje n.º 2) se debe a la distancia de una protuberancia hexagonal a otra, medida a través del intervalo, y su eje está inclinado respecto al primero. Otro filtro (de eje n.º 3) está inclinado un ángulo igual y en sentido contrario. Un cuarto filtro de Ronchi puede ser el resultado de la periodicidad de la estructura a lo largo de cada hilera de protuberancias.

Los fabricantes están ensayando filtros que generan cuadrados y círculos concéntricos. También han comenzado a marcar sus productos mediante un nuevo procedimiento para reseñar los derechos de propiedad. En el interior de cada filtro han introducido un holograma que identifica a la empresa y a sus derechos de propiedad, de manera que, aunque el filtro se corte en trozos muy pequeños, la información correspondiente a ésta última continúa constando en cada trozo, ya que la imagen holográfica puede reconstruirse a partir de cualquiera de los trozos. Por otra parte, el holograma no interfiere con el destino fundamental del filtro, que es actuar como rejilla de difracción.

Colocando dos filtros en el haz del láser pueden crearse imágenes de belleza aún mayor. Por ejemplo, al dirigir el haz simultáneamente a través de un filtro de bola navideña y de un filtro de Ronchi corriente (el orden de los filtros no importa) resulta una figura de interferencia compuesta por otras tres, correspondientes a cada uno de los tres puntos brillantes proyectados por el filtro de Ronchi normal. Al sustituir el filtro de Ronchi sencillo por filtros de Ronchi cruzados ortogonalmente, la imagen se complica más, pero resulta ya menos atractiva a causa de la confusión de puntos; en esta confusión se pierde la ilusión de ver una superficie curva tridimensional. Otra figura muy interesante aparece cuando se ensancha el haz con una lente y luego se le envía a la vez a través de la rejilla en forma de trozos de tarta y de la red del adorno navideño. Haciendo girar la primera, se genera la ilusión de que sobre la pantalla se mueven enjambres de luciérnagas rojas.

Para conseguir que varíe la imagen



Disposición de los elementos ópticos en un espectáculo de luz láser

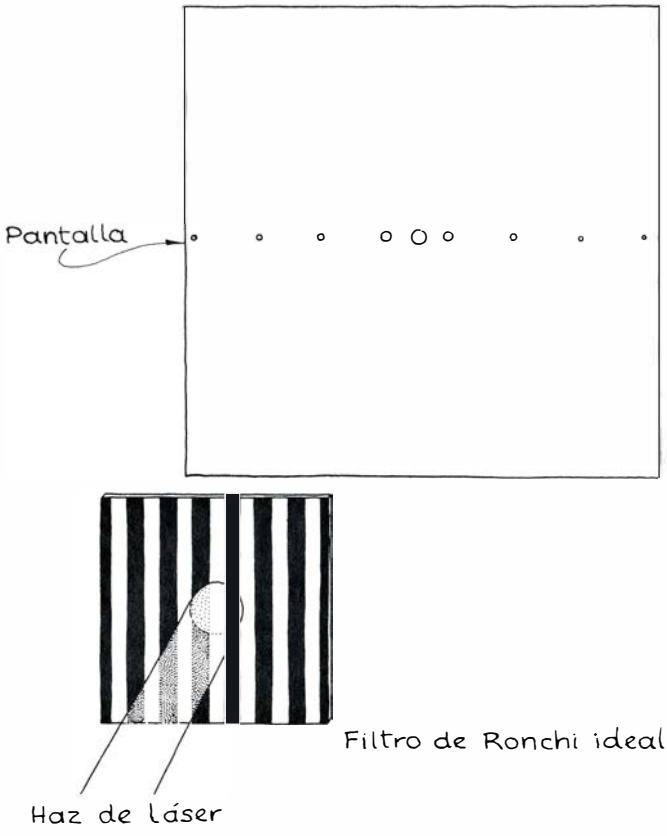


Figura de interferencia producida por un filtro de Ronchi

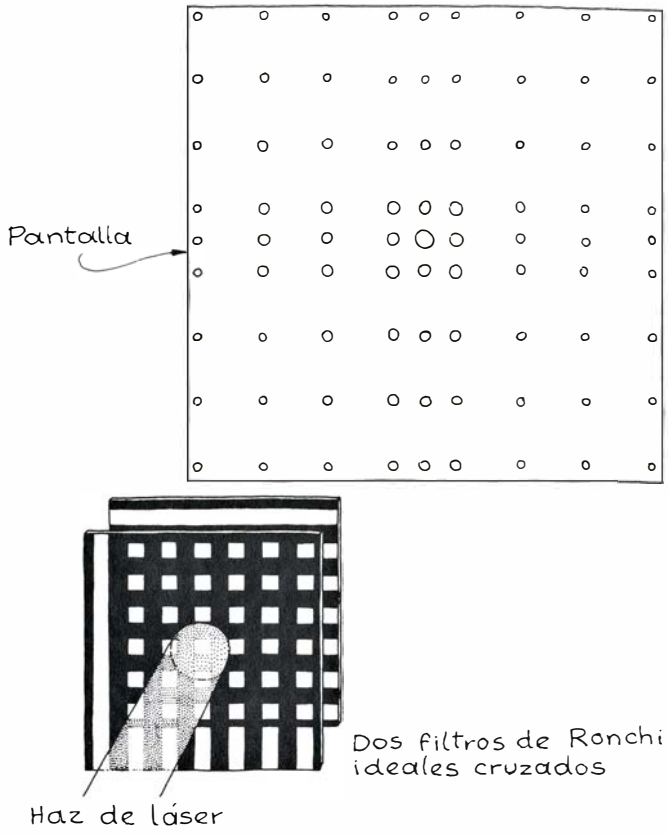


Figura de interferencia producida por dos filtros de Ronchi cruzados en ángulo recto

proyectada en la pantalla pueden hacerse mover los filtros dentro del haz. Este movimiento puede realizarse automáticamente montando los filtros sobre un eje accionado por un motor de baja velocidad. La belleza de la imagen puede aumentarse aún más si la velocidad del motor (y su sentido de giro) se regula ajustando la tensión de un autotransformador de relación regulable (variac). Con unos mandos de este tipo es posible hacer que el ritmo al que cambia la imagen coincida con el compás de la música.

Fotografiando dibujos geométricos de grandes proporciones pueden construirse filtros de Ronchi sencillos o complicados. Por ejemplo, sobre una hoja de papel blanco de grandes dimensiones puede trazarse un conjunto de rayas negras. Si ponemos la hoja de papel sobre el suelo, se ilumina con dos focos que intersecten con ella desde lados opuestos bajo ángulos de 45 grados. Después, se fotografía con una cámara de 35 milímetros enfocada hacia abajo y accionada por cable. Si se emplea película para transparencias, la filmina resultante puede servir de filtro.

En el libro de T. Kallard *Laser Art & Optical Transforms* se describen muchos tipos de filtros para juegos de óptica. El autor señala que si se dibuja el reticulado geométrico con tinta resultan unas rayas de "bordes confusos" a causa del lento corrimiento de la tinta, y una alteración gradual de la transmisión de la luz cerca de los bordes provoca la pérdida de los órdenes superiores en la figura de difracción. Si se desea que en la imagen aparezcan los puntos correspondientes a los órdenes superiores, los bordes deben presentar transiciones bruscas a la transmisión; por ello, Kallard recomienda emplear cinta adhesiva negra del tipo que se vende en las tiendas de artículos para trabajos artísticos. Esta cinta se colocará para formar el reticulado que se desee.

Intercalando vidrio o plástico con dibujos grabados pueden obtenerse figuras de difracción de un tipo diferente. Yo mismo he ensayado plásticos de distintos tipos de los que se emplean para cubrir los huecos de los techos de oficina en los que se alojan las lámparas fluorescentes. Todas estas tapas de plástico llevan dibujos, pero no todos los dibujos se comportan de la manera idónea dentro del haz de láser. La tapa más efectiva es la que tiene una superficie que parece como si la hubieran tallado con una espátula. Hay otras superficies con protuberancias hexagonales o semiesféricas. Estas superficies tienen menos interés si simplemente se intercalan en el haz, pero proporcionan imágenes sumamente interesantes cuando se las hace deslizar de un lado a otro del haz de forma que la figura de interferencia varíe continuamente. La combinación de trozos de plástico con uno de los filtros de difracción puede originar figuras de interferencia sorprendentes. Cuando cualquiera de ambos objetos se monta en un eje rotatorio, la imagen puede variar como la de un caleidoscopio.

La figura de interferencia generada al agitar un trozo de plástico se debe a la refracción que sufre la luz al atravesar el plástico. En efecto, los distintos rayos luminosos contenidos en el haz del láser atraviesan distintas superficies, cada una de las cuales está inclinada de manera diferente. Por tanto, los rayos recorren distintas longitudes dentro del plástico y emergen por superficies de distintas inclinaciones. Resultado de ello es que, aunque los rayos fueran inicialmente paralelos entre sí (o casi, según la divergencia del láser), ya no lo son después de atravesar el plástico. Entonces, los rayos que se solapan se interfieren entre ellos en la pantalla creando rayas brillantes y oscuras.

Pueden conseguirse los mismos efectos aplicando cola de aviación o pegamento a una placa de vidrio o de

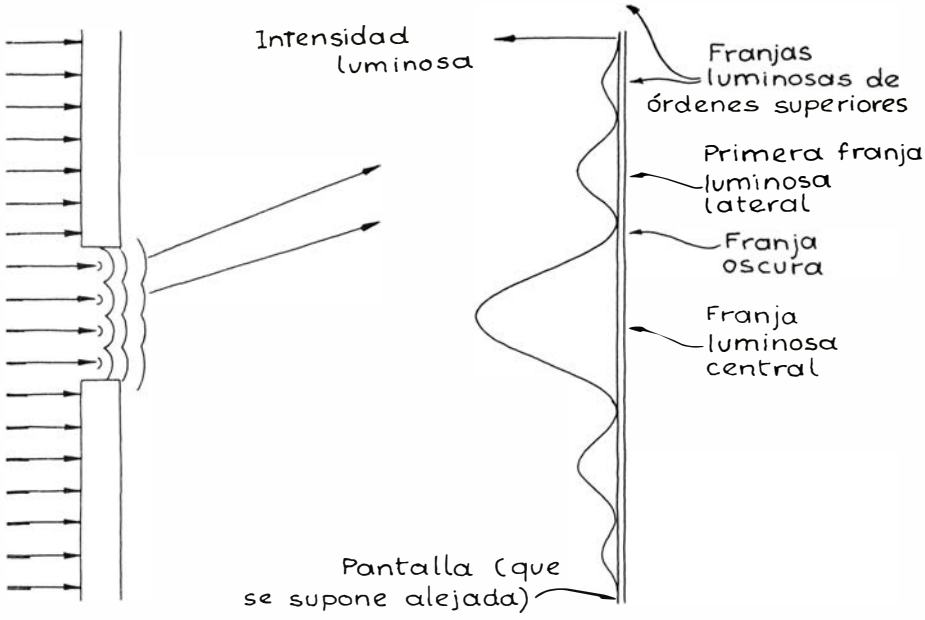


Figura de difracción proyectada por una rendija estrecha

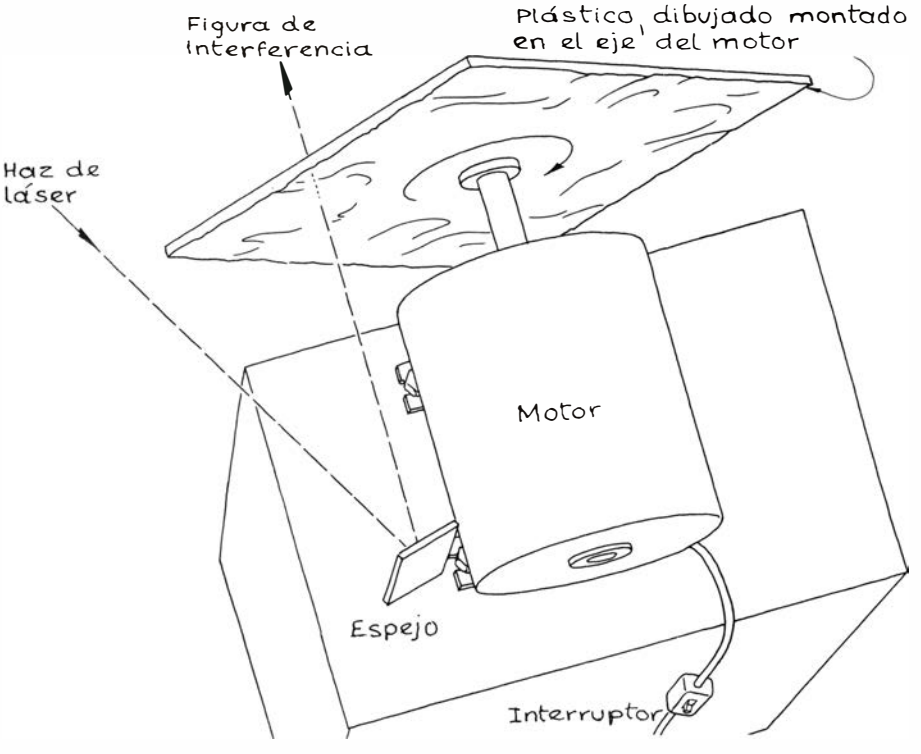
plástico transparente. Mientras se seca, hay que remover la cola, asegurándose no sólo de que la superficie quede suficientemente rugosa, sino además de que la cola se seque con algunas burbujas pequeñas. La superficie rugosa da lugar a una complicada figura de interferencia sobre la pantalla. Las burbujas generan figuras de interferencia más sencillas, pero más agradables, consistentes en franjas oscuras y brillantes, apretadamente espaciadas y dispuestas geométricamente. Durante alguna de mis demostraciones con láser, lo que hago es desplazar una burbuja dentro y fuera del haz al objeto de dotar de movimiento a la figura de interferencia que aparece en la pantalla. Para alcanzar cualquiera de estos efectos interferenciales ha de empezarse por ajustar la distancia entre los componentes ópticos y la pantalla hasta que en ésta aparecen imágenes del tamaño conveniente.

Con el láser puede crearse un conjunto de imágenes completamente diferentes utilizando altavoces a los que se alimenta con una señal de audiofrecuencia y en los que se refleja el haz del láser. Ray Laning, antiguo alumno mío, construyó un sistema como éste con dos altavoces pequeños (del tipo habitualmente empleado en las radios de automóvil), accionados por dos osciladores de audio. Lo que se pretende es que uno de los altavoces desvíe el haz del láser horizontalmente y, verticalmente, el otro. Esta combinación de desviaciones es capaz de crear en la pantalla los complicados dibujos llamados curvas de Lissajous.

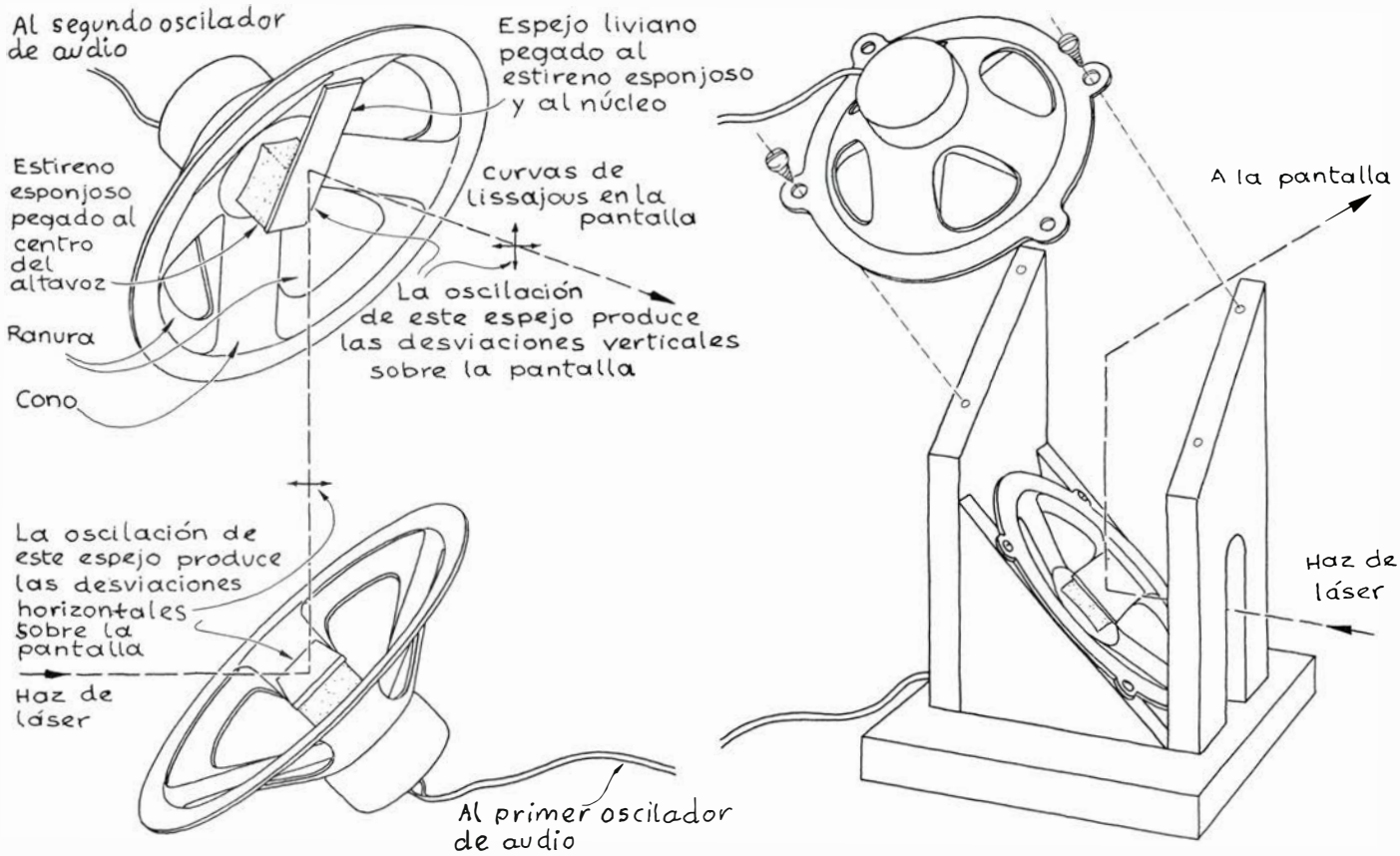
La reflexión del haz del láser se consiguió mediante un pequeño espejo que Laning montó en el interior de cada altavoz. El centro del cono de un altavoz es una zona levemente curva que oscila cada vez que el altavoz recibe una señal de audio. En dicha zona Laning pegó un trocito de estireno esponjoso, previamente conformado para adaptarse a la pequeña curvatura del lugar. La superfice exterior del estireno debía ser plana para que a ella pudiera pegarse uno de los extremos de un pequeño espejo de muy poco peso. El otro extremo de este espejo lo pegó a un lugar del cono situado entre la zona central y el borde exterior. Para este menester hubo que emplear una cola más bien elástica, que no se agrietase ni rompiese durante las oscilaciones.

El espejo y su montura tenían que ser muy ligeros, pues el peso adicional añadido podría haber amortiguado o eliminado las oscilaciones normales del cono. Cuando el altavoz se alimentó con una señal de audio normal, las vibraciones del cono obligaban al espejo a oscilar (más o menos) en torno al punto en que se encontraba pegado al estireno. Para aumentar la amplitud de las vibraciones, Laning practicó ranuras simétricas en el cono dispuestas radialmente desde la zona central hacia el borde exterior. Estas ranuras permitieron que el juego de las vibraciones del altavoz fuese mayor, de modo que cuando el sistema se emplease en la demostración con láser, las desviaciones del haz del láser sobre la pantalla fuesen mayores.

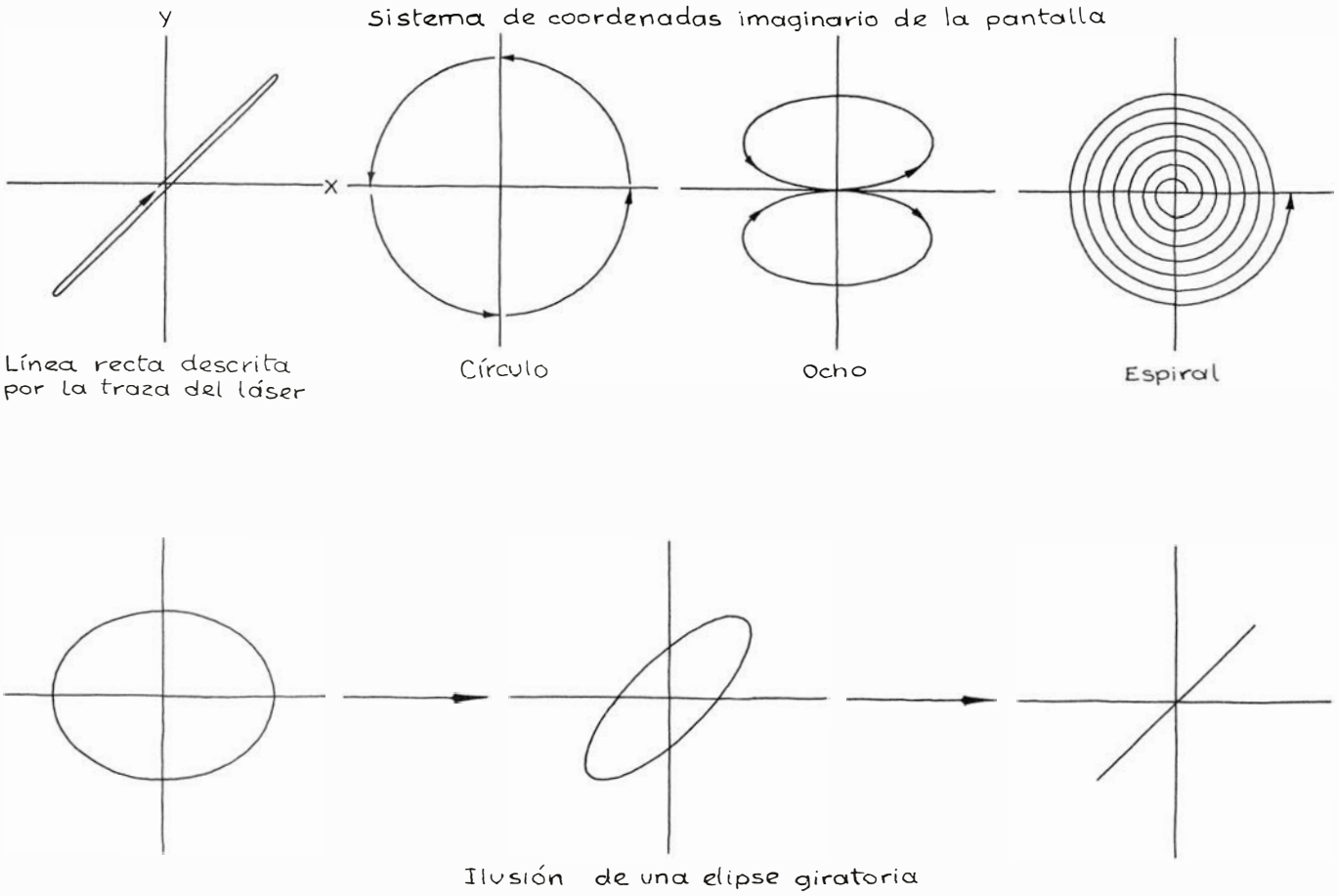
Una vez montados los espejos en ambos altavoces, Laning los fijó a un marco de madera de suerte que el plano de la abertura de cada altavoz formase un ángulo de unos 45 grados con la horizontal. Cuando los altavoces eran excitados por una señal de audio, el espejo de abajo oscilaba horizontalmente (o sea, en torno a un eje vertical) y el espejo de arriba verticalmente (en torno a un eje horizontal). Al espejo de abajo se dirigía el haz del láser, que se reflejaba hacia el espejo de arriba, y desde éste hacia la pantalla. Para alinear el haz, los espejos y la



Dispositivo para hacer girar plástico dibujado dentro del haz del láser



*Disposición de los altavoces para crear curvas de Lissajous (**izquierda**); montaje de los altavoces pequeños (**derecha**)*



Algunas de las curvas de Lissajous que pueden conseguirse con el sistema de altavoces pequeños

imagen final en la pantalla nos tuvimos que armar de una buena dosis de paciencia.

Después de alinear el sistema, la imagen recogida en la pantalla era un punto luminoso aislado. Laning conectó luego un oscilador de audio a cada altavoz. Cada oscilador produjo una señal eléctrica sinusoidal que provocó la vibración del altavoz correspondiente, determinando así que los espejos se movieran dentro del haz del láser. Al hacer oscilar el espejo de abajo, éste produjo la desviación horizontal del haz que, por tanto, se movió de una a otra parte a través del espejo superior y horizontalmente a través de la pantalla. A su vez, las oscilaciones del espejo de arriba produjeron la oscilación vertical del haz. De esta forma, el haz se desviaba horizontal y verticalmente a la vez y se desplazaba en consonancia a través de la pantalla.

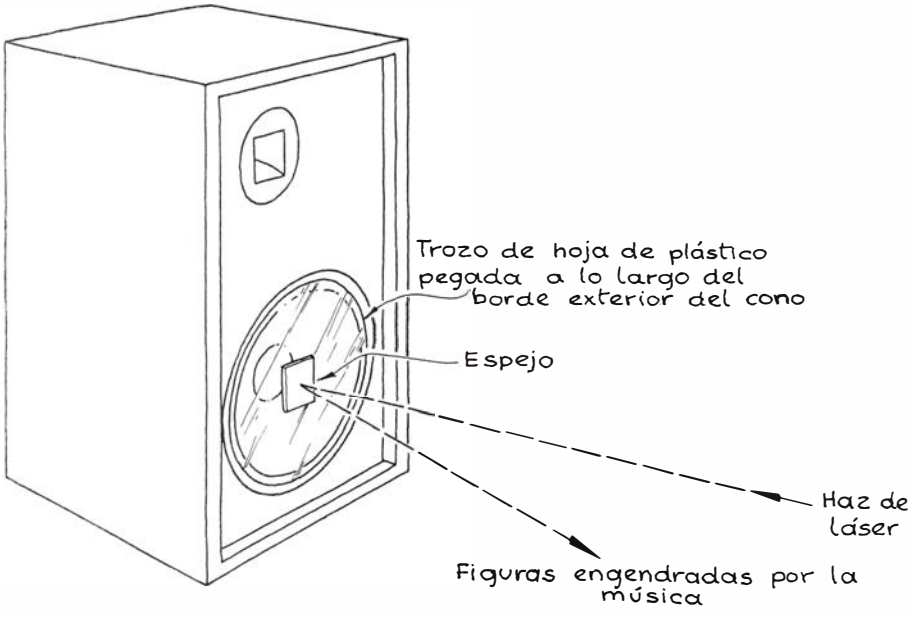
En el sistema se introdujeron dos espejos y dos osciladores de audio, al objeto de controlar por separado la frecuencia y la amplitud de cada desviación. Por ejemplo, supongamos que los espejos se hubieran hecho oscilar a la misma frecuencia. Entonces, en la pantalla podrían haber aparecido varias figuras según cuál fuese la relación de fase de las oscilaciones. Consideremos unos ejes de coordenadas *x-y* superpuestos a la pantalla, tales que el centro de coordenadas coincida con la posición del haz sin desviar. Si el espejo inferior comienza a desviar el haz hacia la derecha a la vez que el espejo superior comienza a desviarlo hacia arriba, el haz se moverá a través de la pantalla desplazándose hacia la parte superior derecha de ésta. Si las amplitudes de ambas oscilaciones son iguales, el haz trazará una línea recta en la pantalla que formará un ángulo de 45 grados con la horizontal. Tras completar una oscilación, el haz volverá a trazar la recta de vuelta al origen y proseguirá hacia la parte inferior izquierda de la pantalla. Mientras continúen las oscilaciones, el haz trazará repetidamente la misma recta inclinada. Una línea recta no es una figura especialmente interesante, pero es el caso de curva de Lissajous que aparece cuando las oscilaciones tienen la misma frecuencia y la misma amplitud y están en fase (lo que significa que ambas señales aumentan y disminuyen a la vez).

Supongamos que, en vez de ser así, la elongación horizontal del haz está en un máximo a la derecha cuando la elongación vertical comienza a enviar el haz hacia arriba. Se dice aquí que las oscilaciones están desfasadas 90 grados. Al tiempo que el haz empieza a retroceder horizontalmente, también comienza a ser enviado hacia arriba; de esta forma, cuando se alcanza la máxima elongación vertical, la elongación horizontal se anula. Correspondientemente, lo que se ve en la pantalla es una porción de otra curva de Lissajous: el punto luminoso describe un trozo de círculo, moviéndose desde el extremo de la derecha hasta el punto más alto del círculo. Al seguir las oscilaciones, el círculo acabará cerrándose y la traza volverá a repetirlo. Si las oscilaciones de los espejos son de baja frecuencia, podrá realmente verse cómo el punto luminoso describe el círculo. A las frecuencias que nosotros empleamos en nuestros espectáculos de luz, el círculo se generaba a tal rapidez que la persistencia de nuestra visión nos produjo la ilusión de que en la pantalla había siempre un círculo completo.

Ajustando los mandos de amplitud de los osciladores, Laning consiguió controlar la amplitud de oscilación de cada espejo. Entonces, cuando hizo que la amplitud de la oscilación horizontal fuese mayor que la de la oscilación vertical, la figura que apareció en la pantalla era una elipse con el eje mayor horizontal. Análogamente, consiguió crear una elipse con el eje mayor vertical.

Ajustando los mandos de frecuencia de los osciladores Laning pudo controlar también las frecuencias de las oscilaciones. Supongamos que se da la misma amplitud a la oscilación de cada espejo, pero que uno de ellos se hace oscilar dos veces más rápido que el otro. Supongamos, además, que la frecuencia mayor corresponde a la oscilación horizontal y que las dos oscilaciones están en fase. Consideremos que inicialmente el haz se encuentra en el origen de coordenadas. Entonces, comenzará a moverse hacia la derecha y hacia arriba, pero debido a la diferencia de frecuencia habrá alcanzado sólo la mitad de la elongación vertical máxima en el instante en que alcance la elongación horizontal máxima. Seguirá moviéndose hacia arriba, aunque ahora comenzará a retroceder hacia la izquierda. En el instante en que la elongación horizontal vuelva a ser nula, la elongación vertical será máxima. La trayectoria así descrita es parte de un número ocho correctamente dispuesto respecto a la vertical. El resto del número ocho se describe en el transcurso de las oscilaciones. Si los espejos oscilan con rapidez suficiente, la persistencia de la visión ofrecerá la ilusión de que en la pantalla hay un número ocho rojo, brillante, Análogamente, puede crearse un número ocho horizontal dotando a la elongación vertical del haz de una frecuencia doble que a la elongación horizontal.

Laning no disponía de procedimiento para controlar las fases relativas. Lo que en realidad ocurría es que las fases variaban de forma desconocida cada vez que se ponían a cero las frecuencias de los osciladores. Por consiguiente, lo que se hizo durante la demostración fue variar las frecuencias y las amplitudes hasta que en la pantalla apareciese una figura agradable. No sólo se consiguió crear rectas, círculos y ochos, sino también curvas de Lissajous más com-



Altavoz preparado

plicadas. Con algunos ajustes, Laning logró crear una figura que variaba lentamente de línea recta a elipse y viceversa. Esta figura cambiante daba la impresión de ser un círculo tridimensional que girase lentamente en la pantalla. A veces, se veía todo el círculo como si estuviese ligeramente inclinado hacia el exterior del plano de la pantalla; otras veces, el círculo aparecía de canto, cual si fuera perpendicular a la pantalla.

Durante una de sus demostraciones, Laning jugó con los mandos al objeto de pasar de una ilusión a otra. A veces, al dar con un círculo, cambiaba rápidamente la amplitud de ambos osciladores y entonces se veía una figura que rápida y suavemente pasaba de círculo grande a círculo pequeño, para luego invertir el fenómeno. Mi impresión era la de estar escudriñando por el extremo abierto de un tubo muy grande. Para oscilaciones más lentas, en las que la persistencia de la visión ya no predomina, la traza de luz láser parecía describir una espiral que constantemente iba y venía de la pantalla. Laning pudo acompasar la ilusión al ritmo de la música.

Utilizando un altavoz accionado por una señal de audio procedente de la misma fuente musical del espectáculo puede conseguirse una respuesta directa de la imagen a la música. Yoel tendió una línea de audio desde mi magnetofón, que proporcionaba la música, hasta una de sus viejas pantallas acústicas estereofónicas, que previamente había modificado. Sobre la abertura del cono de graves extendió una hoja de plástico como las usadas para envolver alimentos, pegándola al borde. (El trabajo resulta más fácil si el cono se coloca señalando hacia arriba.) El trabajo lo realizó con cola blanca corriente, que es suficientemente resistente y estira el plástico dejándolo más tenso después del secado. Durante éste puso unos cuantos libros de buen peso sobre el borde. Terminado el secado, pegó un espejo de poco peso directamente al centro de plástico.

Cuando las señales audio procedentes del reproductor de cassettes de Yoel excitaban el altavoz, las variaciones de la presión del aire encerrado entre el cono y el plástico provocaban la oscilación del plástico y el espejo. Entonces Yoel producía la reflexión de un haz de láser desde el espejo hasta la pantalla. Las figuras, constantemente cambiantes, eran por tanto una respuesta a la música que entraba en el altavoz, y no puramente curvas de Lissajous, aunque la imagen resultaba muy agradable ya que estaba acompasada a la música que oía el público. La respuesta era mayor para las frecuencias musicales bajas, lo cual obedecía a que la masa de aire que había que desplazar en el interior del cono era relativamente mayor.

Estos sistemas con altavoces requieren ambos espejos de poco peso, que pueden adquirirse en tiendas de material científico. La mayoría de los espejos, sin embargo, no reflejan demasiado bien. Si el láser disponible es de gran potencia, esto puede no importar demasiado, ya que la pérdida de algo de luz por absorción en el espejo dejará siempre luz suficiente para que el público pueda apreciarla en la pantalla. Otro problema es que muchos espejos corrientes no dan una reflexión clara y por ello añaden divergencia al haz del láser. Nosotros empleamos un espejo de gran calidad y luego, con un diamante de cristalero, lo cortamos a trozos suficientemente pequeños para montar en los altavoces.

En el sistema proyectado por Laning pueden sustituirse altavoces y espejos por marcos de galvanómetros, lo que puede hacerse aprovechando el de uno de estos instrumentos ya fuera de uso. Estos marcos ofrecen una respuesta más rápida y clara que los altavoces y, por tanto, proporcionan figuras más nítidas en la pantalla. Así, en las demostraciones comerciales en las que se dibuja y se escribe sobre una pantalla con el haz del láser se usan galvanómetros. Pero cualquiera que sea el montaje empleado, debe ponerse cuidado en no alimentar al sistema con una señal excesiva. En varias ocasiones, al instalar nuestros dispositivos hemos hecho estallar los espejos.

Sólo les he mencionado algunos de los procedimientos de láser artístico que pueden utilizarse en los espectáculos de luz. En otro artículo les describiré cómo conseguir que el haz del láser se haga visible al pasar por encima del público.

También les describiré otros muchos procedimientos mediante los cuales proyectar en la pantalla figuras de interferencia. Como observación final, permítaseme recordarles que la luz láser es peligrosa. Al dirigir un haz hacia una pantalla, hay que tomar precauciones para que nadie del público pueda interceptarlo al ponerse de pie. Además, hay que cuidar de que la luz dispersada por la pantalla no adquiera un brillo peligroso. En varios existen normas oficiales estrictas aplicables al uso del láser en exhibiciones públicas.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LAS AREAS OCEANICAS MAS PRODUCTIVAS

UPWELLING. R. L. Smith, dirigido por H. Barnes en *Oceanography and Marine Biology. Annual Review;* vol. 6, págs. 11-46; 1968.

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE AFLORAMIENTO. Varios en *Investigación pesquera,* vol. 35 (1); 1971.

UPWELLING ECOSYSTEMS. Dirigido por R. Boje y M. Tomczac. Springer Verlag, Berlín; 1978.

LA SUPERFICIE DE VENUS

MAPPING OF PLANETARY SURFACES BY RADAR. Tor Hagfors y Donald B. Campbell en *Proceedings of the IEEE,* vol. 61, n.º 9, págs. 1219-1225; septiembre, 1973.

PHYSICAL PROPERTIES OF THE PLANETS AND SATELLITES FROM RADAR OBSERVATIONS. G. H. Pettengill en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics,* vol. 16, págs. 265-292; 1978.

MICROTUBULOS

CYTOPLASMIC MICROTUBULES AND THEIR FUNCTIONS. Keith R. Porter en *Ciba Foundation Symposium: Principles of Biomolecular Organization,* dirigido por G. E. W. Wolstenholme y Maeve O'Connor. Little, Brown and Company, 1966.

MICROTUBULES AND MICROTUBULE INHIBITORS: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MICROTUBULES AND MICROTUBULE INHIBITORS. Dirigido por M. Borgers y M. De Brabander. American Elsevier Publishing Company, 1975.

THE BIOLOGY OF CYTOPLASMIC MICROTUBULES. Dirigido por David Soifer. *Annals of the New York Academy of Sciences,* vol. 253; 1975.

CELL MOTILITY. Dirigido por Robert Goldman, T. Pollard y J. Rosenbaum. Cold Spring Harbor Laboratory, 1976.

MICROTUBULES. Pierre Dustin. Springer-Verlag, 1978.

THE EVOLUTIONARY ORIGIN AND PHYLOGENY OF MICROTUBULES, MITOTIC SPINDLES AND EUKARYOTE FLAGELLA. T. Cavalier-Smith en *Bio Systems,* vol. 10, n.º 1, 2, págs. 93-114; abril, 1978.

CONTROL OF MICROTUBULE ASSEMBLY *IN VIVO*. Elizabeth C. Raff en *International Review of Cytology,* vol. 59, págs. 1-96; 1979.

LA PLACENTA

GLUCOSE METABOLISM VIA THE PENTOSE PHOSPHATE PATHWAY RELATIVE TO CELL REPLICATION AND IMMUNOLOGICAL RESPONSE. Peter Beaconsfield, Jean Ginzburg y Z. Kosinski en *Nature,* vol. 205, n.º 4966, págs. 50-51; 2 de enero de 1965.

THE METABOLISM OF THE PLACENTA. A. J. Szabo y R. D. Grimaldi en *Advances in Metabolic Disorders,* vol. 4, págs. 185-222; 1970.

THE HUMAN PLACENTA. James D. Boyd y William J. Hamilton. Macmillan, Inc., 1974.

PLACENTA-A NEGLECTED EXPERIMENTAL ANIMAL. Peter Beaconsfield y Claude Villee. Pergamon Press, 1979.

SYMPOSIUM ON MATERNAL RECOGNITION OF PREGNANCY. Ciba Foundation Symposium, n.º 64. Excerpta Medica, 1979.

EL ELECTRON AISLADO

THE *g* FACTOR OF THE ELECTRON. H. R. Crane en *Scientific American*, vol. 218, n.º 1, págs. 72-85; enero, 1968.

THE CURRENT STATUS OF THE LEPTON *g* FACTORS. A. Rich y J. C. Wesley en *Reviews of Modern Physics,* vol. 44, n.º 2, págs. 250-283; abril, 1972.

HIGH MASS RESOLUTION WITH A NEW VARIABLE ANHARMONICITY PENNING TRAP. R. S. Van Dyck, Jr., D. J. Wineland, P. A. Ekstrom y H. G. Dehmelt en *Applied Physics Letters,* vol. 28, n.º 8, págs. 446-448; 15 de abril de 1976.

ANTECEDENTES DE LA CIVILIZACION DEL VALLE DEL INDO

LA CIVILISATION DE L'INDUS ET SES ÉNIGMES. Jean-Marie Casal. Librairie Arthème Fayard, 1969.

THE ROOTS OF ANCIENT INDIA. Walter A. Fairservis, Jr. University of Chicago Press, 1975.

ANCIENT CITIES OF THE INDUS. Dirigido por Gregory Possehl. Carolina Academic Press, 1979.

SOUTH ASIAN ARCHAEOLOGY 1977. Dirigido por Maurizio Taddei. Istituto Universitario Orientale, Seminario di Studi Asiatici, Nápoles, 1979.

TECNOLOGIA DE LAS MEMORIAS DE DISCO

DIGITAL MAGNETIC RECORDING. Albert S. Hoagland. John Wiley & Sons, Inc., 1963.

A NEW CLASS OF DIODE LASERS. Morton B. Panish e Izuo Hayashi en *Scientific American,* vol. 225, n.º 1, págs. 32-30; julio, 1971.

IBM JOURNAL OF RESEARCH AND DEVELOPMENT, vol. 18, n.º 6; noviembre, 1974.

COMPUTER STORAGE SYSTEMS AND TECHNOLOGY. Richard E. Matick. John Wiley & Sons, Inc., 1977.

LA MANZANA DE NEWTON Y EL DIALOGO DE GALILEO

UNPUBLISHED SCIENTIFIC PAPERS OF ISAAC NEWTON: A SELECTION FROM THE PORTSMOUTH COLLECTION OF THE UNIVERSITY LIBRARY, CAMBRIDGE. A. Rupert Hall y Marie Boas Hall. Cambridge University Press, 1962.

THE BACKGROUND TO NEWTON'S PRINCIPIA: A STUDY OF NEWTON'S DYNAMICAL RESEARCHES IN THE YEARS 1664-84. John Herivel. Oxford University Press, 1965.

JUEGOS MATEMATICOS

THE PIGEONHOLE PRINCIPLE: "THREE INTO TWO WON'T GO." Richard Walker en *The Mathematical Gazette,* vol. 61, n.º 415, págs. 25-31; marzo, 1977.

EXISTENCE OUT OF CHAOS. Sherman K. Stein en *Mathematical Plums: the Dolciani Mathematical Expositions, No. 4,* dirigido por Ross Honsberger. The Mathematical Association of America, 1979.

THE PIGEONHOLE PRINCIPLE. Kenneth R. Rebman en *The Two-Year-College Mathematics Journal,* edición bufa, págs. 4-12; enero, 1979.

TALLER Y LABORATORIO

OPTICAL SPECTRUM ANALYSIS. Arnold Roy Schulman en *Optical Data Processing.* John Wiley & Sons, Inc., 1970.

FUNDAMENTALS OF OPTICS. Francis A. Jenkins y Harvey E. White. McGraw-Hill Book Company, 1976.

LASER ART & OPTICAL TRANSFORMS. T. Kallard. Optosonic Press, 1979.

Taller y laboratorio

Seguimiento del oleaje ionosférico a través de simples radios de transistores

Jearl Walker

Este mes voy a describirles un dispositivo, muy barato, diseñado por Douglas A. Kohl de Osseo, Minnesota, para detectar las ondas de gravedad que se propagan por la ionosfera. Se llama ionosfera a la zona de la atmósfera superior terrestre donde se encuentran las capas ricas en iones. Aunque no se dispone de un conocimiento exhaustivo de tales ondas se cree que vienen engendradas por fenómenos tales como la corriente de chorro, tormentas de gran intensidad y el bombardeo de partículas solares. No deben confundirse con las ondas de gravitación que aparecen en relatividad generalizada y en cosmología. Estas ondas se propagan más o menos horizontalmente a través de la atmósfera superior, alterando la concentración de átomos y moléculas. Por tanto, modifican también la concentración de iones y crean una perturbación progresiva que produce variaciones en la reflexión de las señales de radio sobre la ionosfera. Captando por radio estas variaciones, Kohl consigue detectar el paso de las ondas de gravedad.

La ionosfera es transparente a las radioseñales de frecuencia superior a unos tres megahertz. Las frecuencias de las señales de televisión y de las bandas de radio de frecuencia modulada (FM) son más altas, por lo que éstas se propagan directamente por la ionosfera. Sin embargo, las señales de radio de las bandas de amplitud modulada (AM) tienen unas frecuencias más bajas, y por ello, se reflejan en la parte inferior de la ionosfera. Ello explica que las ondas de gravedad se detecten a través de las variaciones en la reflexión de las radioseñales de frecuencias inferiores.

La producción de radioondas por medios propios resultaría excesivamente cara y, además, exigiría el permiso de las autoridades competentes. Por consiguiente, Kohl aprovecha la señal emitida por alguna emisora local de amplitud modulada. Para ello sugiere elegir una emisora que se encuentre dentro de un radio de unos 50 kilómetros y que funcione a plena potencia todas las horas del día. Parte de la señal de radio generada por la emisora local viaja directamente hacia el detector y otra parte viaja hacia la ionosfera y después hacia el detector. El primer objetivo del aparato diseñado por Kohl es eliminar la señal que llega directamente al detector para registrar sólo la señal procedente de la ionosfera.

El detector en cuestión consiste en una radio de transistores modificada, dotada de una antena de núcleo de ferrita. Esta antena se orienta hasta que la señal reflejada procedente de la emisora de radio sea máxima. Habitualmente la orientación óptima se obtiene con la antena horizontal y perpendicular, a la vez, a la recta que une el receptor con la antena transmisora. La necesidad de esta orientación reside en que la señal de radio está polarizada y sus campos eléctrico y magnético oscilan según ejes particulares. Cuando los electrones de la antena transmisora oscilan, radian ondas electromagnéticas a la frecuencia de AM. La onda que viaja directamente hasta el receptor tiene un campo eléctrico que oscila a lo largo de un eje vertical y un campo magnético que oscila a lo largo de un eje horizontal, de forma que ambas direcciones de oscilación son perpendiculares a la recta a lo largo de la cual se propaga la onda. Esta recta se llama rayo. La antena de núcleo de ferrita de la radio responde a las oscilaciones del campo magnético; así, cuando aquélla se encuentre paralela a éste, recibirá con mayor eficiencia el campo magnético de la onda de radio. De aquí que deba estar horizontal y perpendicular al rayo. (Las antenas de automóvil normales responden a las oscilaciones del campo eléctrico y no del magnético, por lo que las señales de AM las reciben en las mejores condiciones cuando están verticales, lo que suele ser, por supuesto, el caso.)

Para eliminar la señal procedente directamente de la emisora Kohl mueve la antena de la radio hasta que la señal de aquélla es mínima. La antena podría quedar en posición horizontal y apuntando hacia la emisora, o bien vertical. Con la antena orientada en cualquiera de estas dos posiciones, apenas si se recibe señal directa, pero se sigue recibiendo la señal reflejada en la ionosfera, al encontrarse la antena parcialmente alineada con el campo magnético de la señal.

Hay numerosas perturbaciones de los iones de la ionosfera que se originan en la zona inferior de ésta; recordemos las ondas de gran período, alteraciones de la estructura química de los iones y alteraciones en la concentración de éstos por lluvia meteórica. Kohl pretendía detectar las perturbaciones debidas a ondas de gravedad de algunas horas de duración. El paso de una onda de gravedad a través de la capa reflectora desplaza la altitud a la cual se reflejan las señales de radio, variando así la intensidad de la respuesta de la antena receptora. Al aumentar la altitud del punto de reflexión, crece la respuesta de una antena en posición horizontal porque el campo magnético de la señal reflejada está mejor alineado con la antena; en el caso de una antena en posición vertical, la respuesta disminuye al no hallarse el campo tan bien alineado.

Describiré primero cómo construir un detector capaz de captar ondas de gravedad. Expondré luego cómo puede perfeccionarse el sistema si añadimos más aparatos de radio y detectar así nuevas características de las ondas de gravedad. Según Kohl debe elegirse una radio de transistores portátil de AM con una antena de núcleo de ferrita cuya longitud sea de unos quince centímetros como mínimo. Cuanto más larga sea la antena, tanto mejores serán los resultados.

Si se pretende hacer mediciones nocturnas, la radio deberá tener además un sintonizador de radiofrecuencia que proporcione la selectividad suficiente para evitar las interferencias con señales de radio muy distantes. Por la noche las señales de radio pueden detectarse a distancias mucho mayores. En efecto, al ponerse el sol, desaparece la luz solar causante de la ionización de átomos y moléculas de la parte inferior de la ionosfera y, en consecuencia, disminuye el número de iones y aumenta la altitud a la cual se reflejan las radioseñales. Esta altitud adicional de la reflexión significa que una señal de radio potente podrá propagarse mucho más lejos a lo largo de la curvatura terrestre.

El circuito de la mayoría de las radios de transistores portátiles de AM obedece a un esquema como el ilustrado en la página siguiente. Este circuito se modifica primeramente cortando la conexión situada en el lugar que en el diagrama se indica por *x* e *y*, de forma que el control de ganancia pueda pasar de automático a manual. El corte se efectúa junto al control de volumen de la radio. En dicho punto se intercala un circuito adicional cuya misión es proporcionar un control manual para registrar la señal reflejada en la ionosfera. La sección de baja sensibilidad del circuito se necesita para restablecer la sensibilidad de la radio a las emisoras débiles. Si la radio tiene transistores *n-p-n* en lugar de los *p-n-p* que se suponen en el diagrama, la conexión a la batería deberá hacerse al terminal positivo, no al negativo. Para estos tipos de radio deberán invertirse las polaridades del medidor, del registrador y del "ajuste en cero", de los que voy a ocuparme.

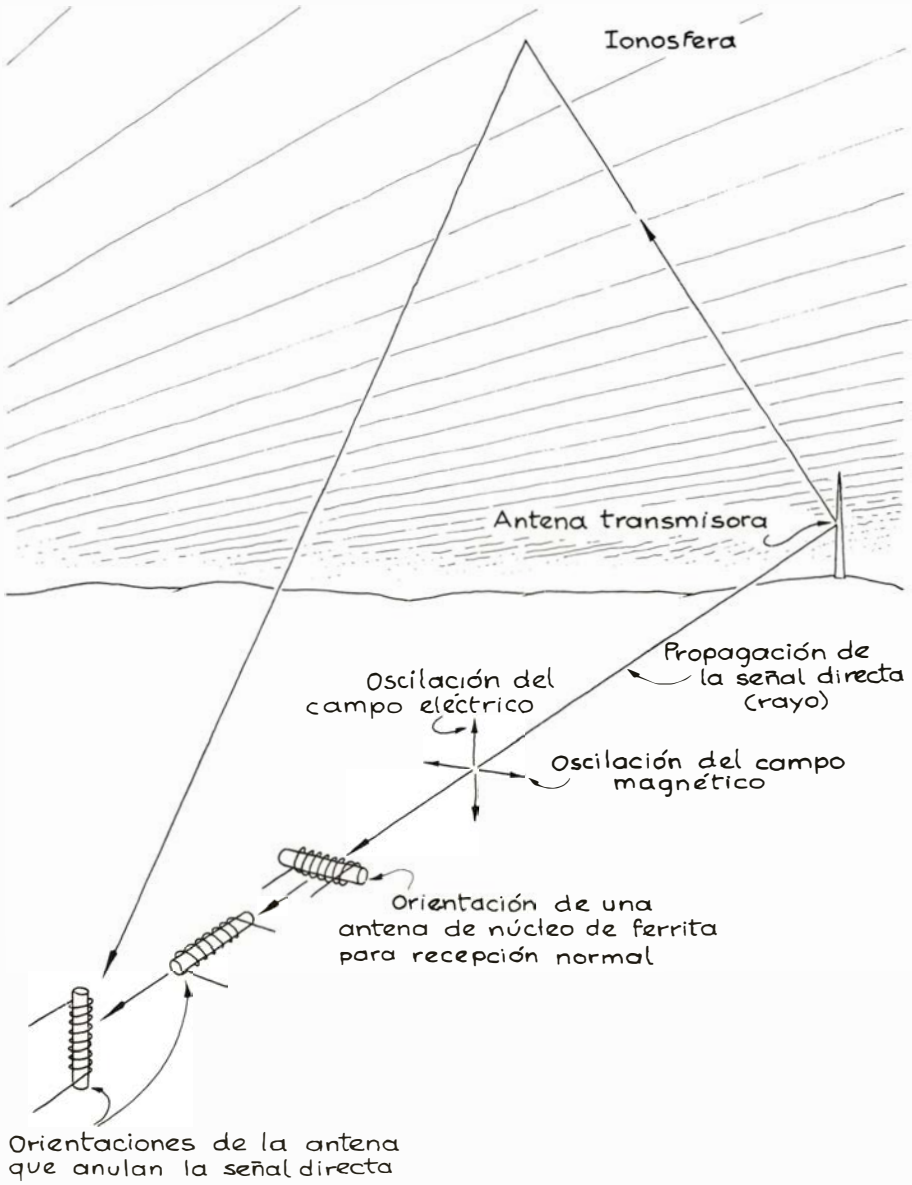
La señal de salida del control de ganancia manual es amplificada y filtrada en el circuito que se representa en la ilustración de la página 168. El filtro de paso bajo elimina la modulación de la voz y la música de la señal de radio, dado que sólo interesa la intensidad de la señal reflejada en la ionosfera. Este filtro elimina también las perturbaciones atmosféricas breves, los chasquidos y las interferencias de origen humano como interruptores eléctricos, igniciones de automóvil y cosas similares.

Este filtro deja pasar las variaciones de intensidad de la señal reflejada que tienen lugar durante algunos minutos. De estas variaciones, que emergen en el punto señalado como "canal de señales", se saca una gráfica en un registrador de banda conectado al otro extremo del filtro de paso bajo. Kohl ha comprobado que basta una velocidad de registro de unos dos centímetros y medio por hora y, por ello, puede usarse un registrador de banda sin tinta. Este instrumento ha de tener una intensidad nominal de un miliampère de corriente continua. Como se pretende que la respuesta del registrador a la señal de radio sea lenta, antes del filtro de paso bajo se instala un medidor ("medidor de señales rápidas") para indicar las variaciones más veloces de la intensidad de la señal. La intensidad nominal del medidor ha de ser también de un miliampère de corriente continua.

Además de seguir las variaciones periódicas indicadas por el registrador de banda, Kohl capta también "ruido" de la ionosfera; y se vale para ello de otro circuito conectado después del filtro de paso bajo. Este circuito mide la frecuencia (en veces por minuto) a la que cambia de polaridad la señal. Para ello cada vez que la intensidad de la señal sobrepasa un valor de referencia prefijado se envía un impulso al circuito de velocidad de contaje. Por ejemplo, si la ionosfera se muestra relativamente ruidosa, la intensidad de la señal puede oscilar, con bastante rapidez y en torno a un valor medio, varias veces por minuto; y esta variación rápida se registra. En momentos de mayor tranquilidad la oscilación de la intensidad de la señal será menor. La salida del circuito de velocidad de contaje se envía a través de un filtro, y después a través del "canal de ruido", a otro registrador de banda del mismo tipo que el que registra la intensidad de la señal.

Para alimentar todos los circuitos, incluida la radio, Kohl emplea el circuito de alimentación esquematizado en la página 170. Salvo que la radio presente unas demandas de corriente desacostumbradamente altas, no será necesario que las aletas disipadoras de calor de los reguladores de tensión (LM 340T-8 y LM 320T-8) se monten en sumideros de calor. Kohl advierte contra la eliminación de los condensadores de 0,1 microfarad de este circuito, pues si se prescinde de ellos los rectificadores interferirán con la radio.

Supongamos que lo tenemos todo preparado para captar por radio la ionosfera. Se sintoniza la radio con una emisora lejana y débil. (Todas las modificaciones han dejado invariable la parte de audio de la radio.) Con la antena en posición horizontal se ajusta el mando de baja sensibilidad hasta que el sonido procedente de la emisora



Fundamento del sistema de detección de Douglas A. Kohl

sea máximo. Este mando quedará fijo entonces durante el resto del experimento.

Se sintoniza luego la radio con la emisora local elegida para el experimento y se hace girar la antena en torno a un eje vertical hasta que el nivel de sonido alcance el mínimo. (Si la antena está unida rígidamente a la caja, habrá que hacer girar también la radio.) Después se ajusta la ganancia hasta que la aguja del medidor de señales rápidas se encuentra hacia la mitad de la escala. Se comprueba la antena para asegurarse de que su orientación es la óptima para que el nivel de sonido sea el mínimo. Si es así, la aguja del medidor de señales rápidas debe estar fluctuando lentamente y el sonido de la radio debe presentar una distorsión de magnitud variable. Entonces, lo que se oye es la señal de radio reflejada en la ionosfera.

Si el detector está rodeado de una cantidad apreciable de metal, como ocurriría en un edificio de apartamentos o de oficinas, puede haber dificultades para eliminar la señal procedente directamente del transmisor. Probar entonces distintas ubicaciones hasta encontrar una conveniente. Para determinar la ubicación más idónea se observa el medidor de señales rápidas; si la anulación de la señal directa es correcta, la aguja del instrumento fluctuará uniformemente. Estas variaciones rápidas las alisa el filtro de paso bajo, de forma que el registrador de banda situado a la salida del canal de señales responda a las variaciones más lentas de la intensidad de la señal. El registrador de banda necesita del orden de cinco minutos para trazar la gráfica de cambio en la intensidad de la señal. El canal de ruido no necesita ajustes.

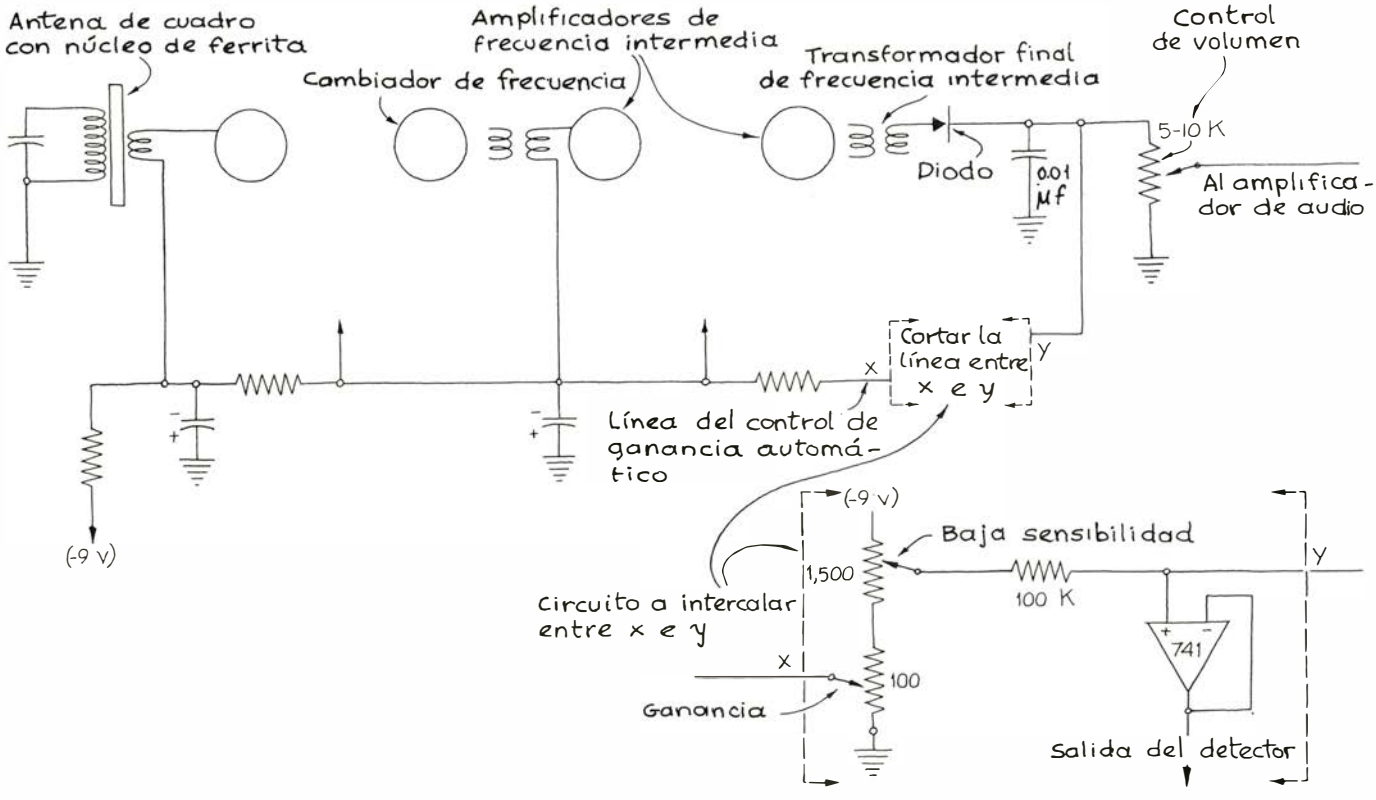
Una gráfica senoidal en la salida del canal de señales significa que una onda de gravedad está atravesando la región en la que se ha reflejado la señal de radio. Según Kohl, el aspecto de la gráfica procede de cambios pequeños y aparentemente aleatorios en la salida dada por el registrador. El tiempo entre dos crestas de la gráfica puede estar comprendido entre cinco y 40 minutos, pero habitualmente varía entre 15 y 25 minutos.

Un defecto del sistema receptor básico es que es sensible a interferencias de muchos orígenes, lámparas fluorescentes y relámpagos, por ejemplo. Para eliminar estas interferencias Kohl dispone otro sistema receptor junto al primero. Las antenas de ambos se colocan aproximadamente paralelas, pero la del segundo se sintoniza con una frecuencia que difiera en unos 100 kilohertz (una frecuencia que no sea usada por ninguna emisora local). Por tanto, la señal eléctrica de una antena no estimulará respuesta en la otra.

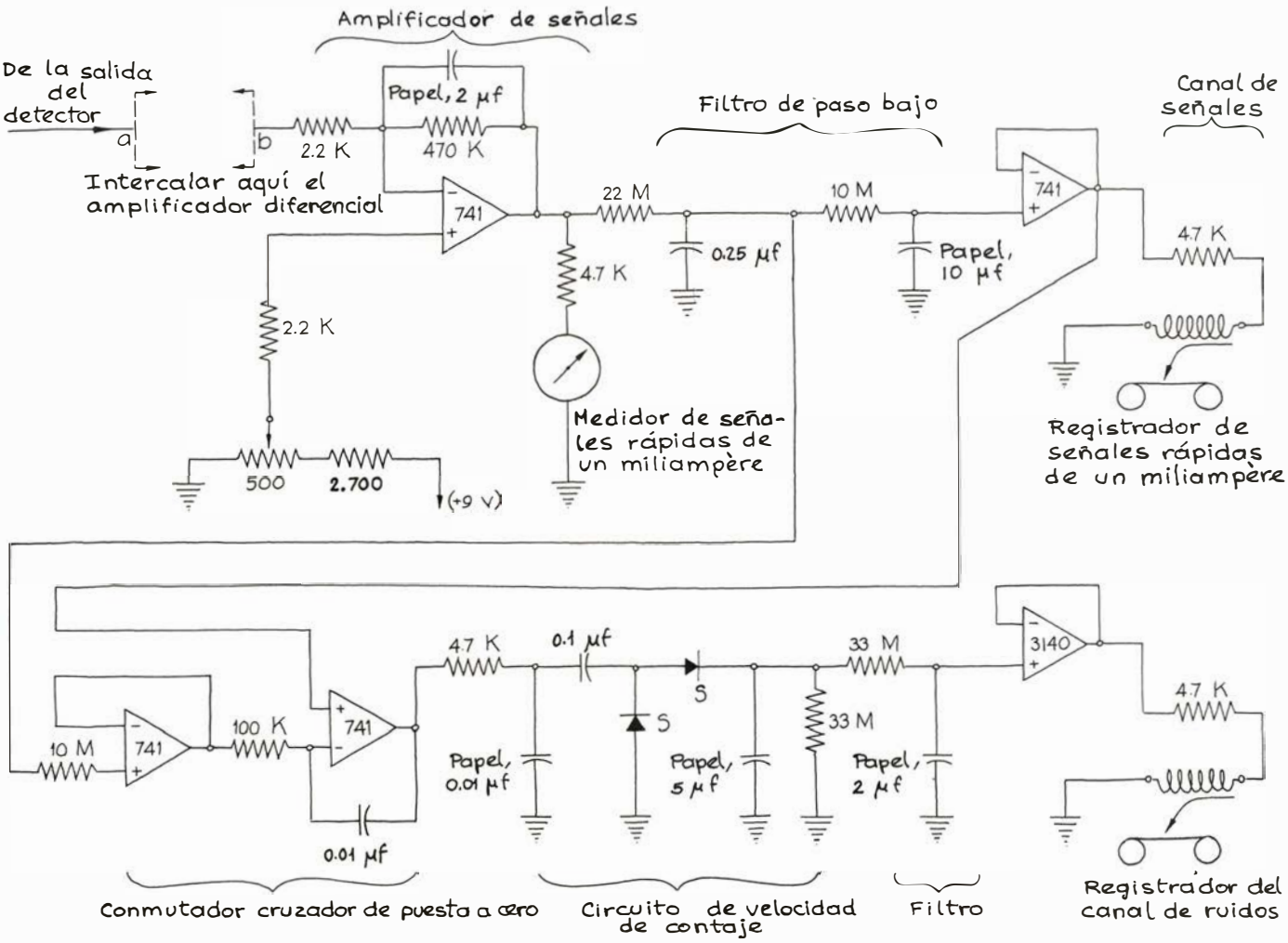
Con esto, el primer receptor seguirá respondiendo a la señal reflejada en la ionosfera y a las interferencias de otras fuentes, mientras que el segundo únicamente captará las interferencias. Se introducen las salidas de ambos aparatos en un amplificador diferencial, cuyo circuito aparece en la tercera ilustración de la página 172. Este amplificador sólo da la diferencia entre las dos señales procedentes de los receptores y, como resultado, la salida final carecerá de las señales de interferencias y contendrá únicamente la señal reflejada en la ionosfera.

Utilizando dos receptores más puede medirse a qué altura se ha reflejado la señal en la ionosfera. Estos receptores han de ser iguales a los dos primeros, pero sus antenas deben estar verticales. En una antena horizontal, la señal reflejada induce una respuesta proporcional al seno del ángulo que forman la horizontal y el rayo procedente de la ionosfera. En una antena vertical la respuesta es proporcional al coseno de dicho ángulo. La tangente de éste puede entonces calcularse hallando el cociente entre la respuesta de la antena horizontal y la respuesta de la antena vertical. (Los receptores deben ser iguales o este cociente dará un dato falseado.)

El rayo recibido partió de la antena transmisora formando con la horizontal el mismo ángulo aproximadamente. Para calcular a qué altura se encuentra



Modificación de una radio de transistores por el procedimiento de Kohl



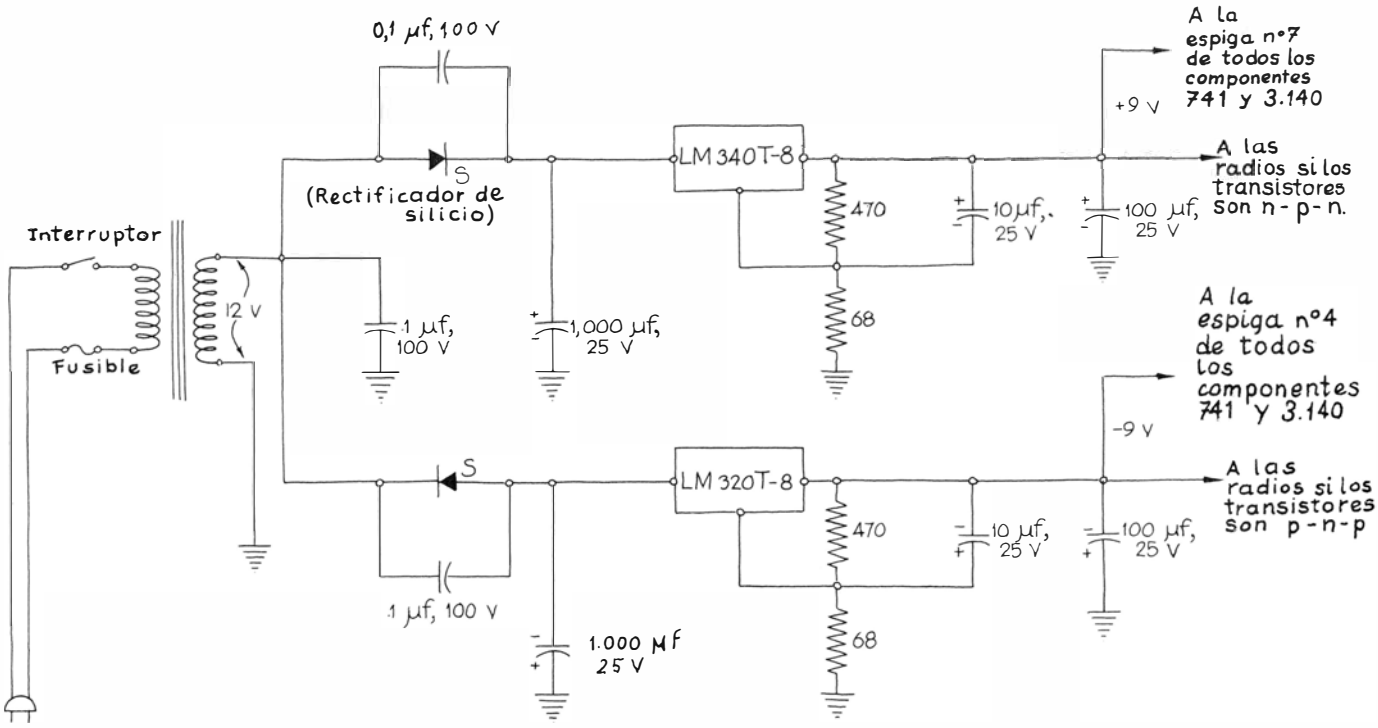
Disposición para obtener la salida del canal de señales y del canal de "ruido"

la capa reflectante se determina un valor aproximado de la distancia en horizontal existente hasta la antena transmisora (sobre la hipótesis de que entre el detector y la emisora la tierra es plana) y se multiplica la mitad de esta distancia por la tangente del ángulo en cuestión. El valor resultante es la altura a la que se encuentra la capa reflectante de la ionosfera.

La altura de la reflexión depende de la frecuencia de la señal: cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la altura a la que se refleja la señal. Sintonizando dos sistemas receptores básicos con dos frecuencias diferentes podemos captar la onda de gravedad ionosférica a dos alturas diferentes. Estos sistemas constan cada uno de un receptor de radio, que recoge la señal reflejada a la frecuencia elegida, y otro receptor cuya misión es eliminar las interferencias ambientales. Kohl recomienda trabajar con las señales de dos emisoras locales aproximadamente alineadas con el aparato. Uno de los receptores debe funcionar a una frecuencia próxima a los 1500 kilohertz y el otro en la vecindad de los 600 kilohertz.

Si las gráficas de la onda de gravedad son similares en ambos dispositivos es que la onda abarca una distancia vertical bastante considerable. Gráficas disímiles implican que la onda de gravedad se propaga a través de una capa relativamente estrecha. Para no dejar ningún cabo suelto en el experimento, se necesitan ocho radios, cuatro de ellos funcionando en cada extremo de la banda de AM. Dos, de cada grupo de cuatro, han de tener las antenas horizontales, sintonizando uno de ambos aparatos con una emisora local y haciendo que el otro simplemente actúe como receptor de interferencias para eliminarlas. Las otras dos radios de cada grupo de cuatro actúan de la misma forma, pero con las antenas verticales. Al calcular el cociente entre la respuesta de la antena vertical y la respuesta de la antena horizontal, el experimentador podrá determinar a qué altura se reflejó la señal de radio. Los mismos cálculos pueden hacerse en el otro extremo de la banda de AM y se encontrará que las señales de radio de frecuencias diferentes se reflejan a alturas diferentes.

La forma en que la reflexión depende de la frecuencia está relacionada con la manera en que las ondas de radio se reflejan en la ionosfera. Una señal de radio se compone de un campo eléctrico y un campo magnético oscilantes que interactúan con los iones. La interacción fundamental tiene lugar a través del campo eléctrico, por lo que ignoraremos el campo magnético. Además voy a suponer que la onda de radio está polarizada linealmente, de manera que el campo eléctrico oscila a lo largo de un eje único perpendicular a la dirección de propagación de la señal de radio. Cuando la onda de radio atraviesa altitudes donde se encuentran electrones libres, su campo eléctrico crea una fuerza eléctrica sobre los electrones, haciendo que éstos oscilen compartiendo el eje de oscilación del campo. (Puede ignorarse el movimiento de los iones más pesados ya que, al ser su masa mucho mayor, las oscilaciones correspondientes serán mucho más reducidas.) En el modelo que habitualmente se usa para describir la interacción entre ondas de radio y electrones se establece que la onda de radio es



Circuito de potencia del dispositivo

absorbida por los electrones y después vuelta a emitir por la oscilación de éstos. Y, salvo que la onda remitida se refleje, ésta se propagará en la misma dirección que la onda incidente y parecerá ser una continuación de la primera.

La frecuencia de oscilación de los electrones se llama frecuencia de plasma. Si la frecuencia de la señal de radio es superior a la de plasma, la señal seguirá propagándose a través de la capa de iones. Si la radiofrecuencia es inferior a este valor crítico, la señal penetrará sólo unos pocos centímetros y luego se reflejará. La frecuencia de plasma ionosférico es aproximadamente de tres megahertz, aunque su valor real depende de la concentración de electrones, de tal manera que cuanto mayor sea la concentración mayor será la frecuencia de plasma. En la zona inferior de la ionosfera la concentración de electrones aumenta con la altura y, por ello, una señal de radio progresará hacia arriba por dentro de la ionosfera hasta alcanzar una concentración de electrones suficientemente elevada para reflejarla. Si la señal no topa con tal concentración, se limitará a progresar a través de la ionosfera y saldrá al espacio.

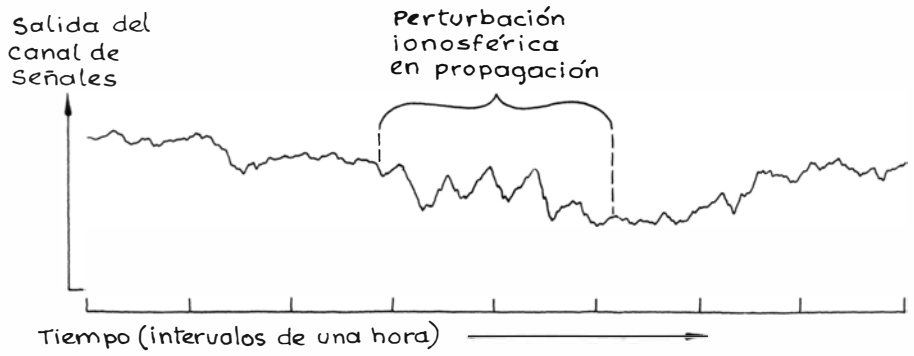
Las señales de radio de frecuencias correspondientes al extremo inferior de la banda de AM se reflejan en puntos de la ionosfera relativamente bajos. Las señales de frecuencias correspondientes al otro extremo de la banda deberán propagarse hasta altitudes mayores antes de ser reflejadas. Kohl aprovecha esta relación para tantear los efectos de las ondas de gravedad en las dos alturas de reflexión.

Como antes mencioné, Kohl anula en uno de sus dispositivos la señal directa de la antena transmisora, valiéndose de una antena receptora vertical que no responde al campo magnético oscilante horizontalmente de la señal linealmente polarizada. Si la señal reflejada en la ionosfera estuviese asimismo polarizada linealmente con su campo magnético en oscilación horizontal, tampoco generaría respuesta alguna en la antena. Por fortuna, la reflexión altera la polarización de la señal de suerte que ésta sí puede generar una respuesta. Cuando los campos eléctricos oscilantes de la onda de radio ponen en movimiento a los electrones de la ionosfera, éstos resultan también afectados por la fuerza magnética engendrada por la presencia del campo magnético terrestre. Esta fuerza magnética no interviene si los electrones no adquieren velocidad, por lo que no actúa hasta la llegada de la onda de radio y, entonces, hace que las cargas den vueltas alrededor del rayo de radioonda.

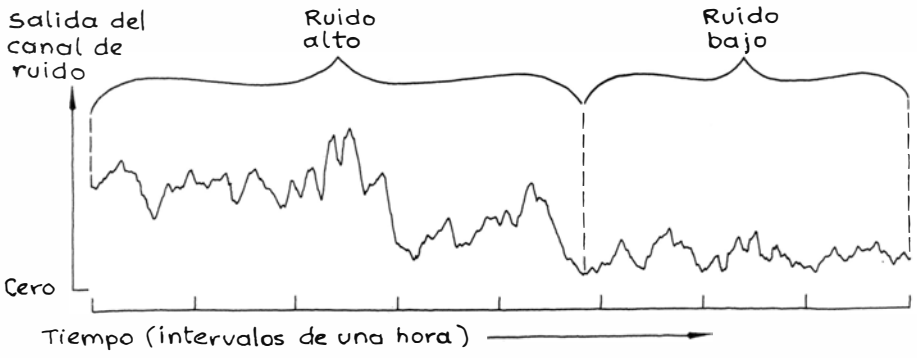
Para abordar matemáticamente la interacción entre los campos eléctricos de la radioonda, el campo magnético terrestre y el movimiento de los electrones suele suponerse que la radioonda consta de dos ondas que se propagan en la misma dirección. Ninguna de esta ondas está dotada de la polarización lineal que tiene la onda procedente de la antena transmisora, pero entre las dos la originan matemáticamente. La ventaja de separar la onda en dos componentes reside en que así resulta más sencillo explicar la polarización de la onda reflejada.

Estas dos radioondas imaginarias no están polarizadas linealmente, sino circularmente. El eje de polarización de una de ellas gira en un sentido alrededor del rayo de la señal de radio, mientras que el eje de polarización de la otra gira alrededor del rayo en el sentido contrario al anterior. En presencia del campo terrestre, estas dos ondas se propagan a través de la ionosfera a distintas celeridades. En términos de óptica diríamos que la ionosfera es birrefringente.

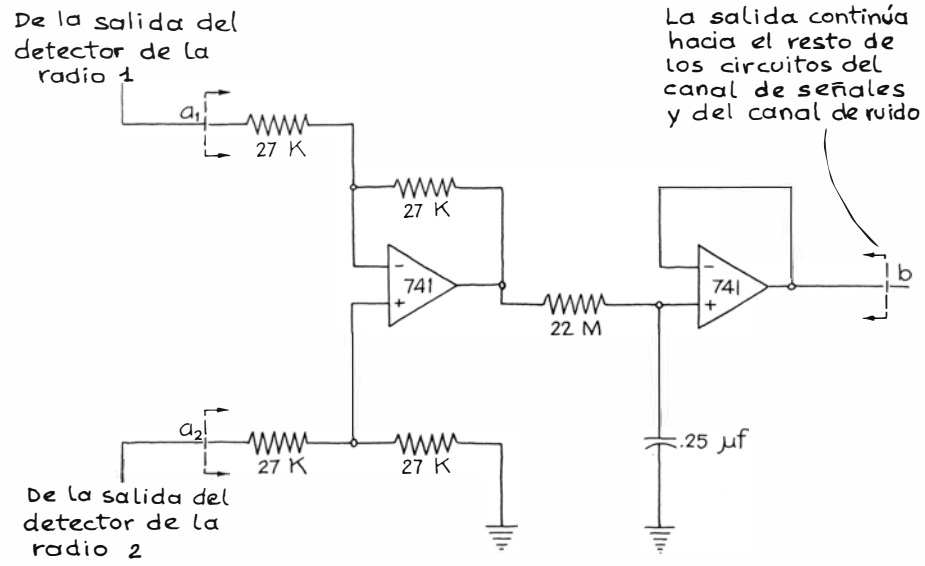
Ambas ondas se propagan por la ionosfera de distinto modo; y no sólo eso: se reflejan, además, de manera diferente. En algunos casos una de ellas se transmitirá en parte a través de la ionosfera y en parte se reflejará. La otra, cuyo sentido de polarización circular se opone al de la anterior, puede resultar reflejada por completo. La combinación de las dos reflexiones origina una onda polarizada elípticamente, una onda cuyo campo eléctrico gira alrededor del rayo y describe una elipse, no un círculo. (La ilustración inferior de la página 172 representa una de las posibilidades que tiene la señal



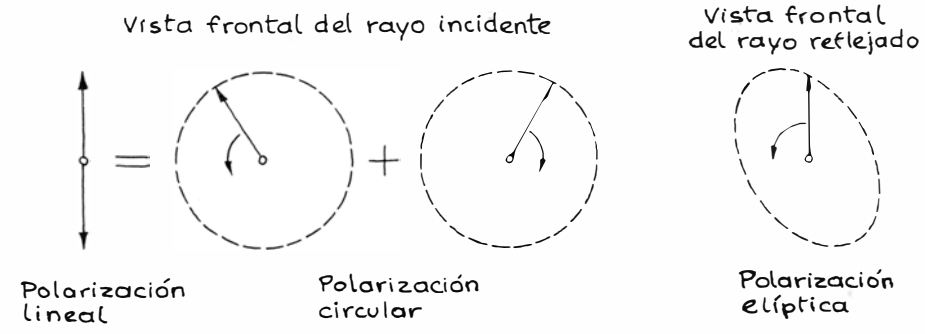
Representación en un registrador de banda de una perturbación ionosférica progresiva



Una gráfica dada por el canal de ruido



Circuito del amplificador diferencial para eliminar las interferencias locales



Variación de la polarización de una onda de radio como consecuencia de la reflexión en la ionosfera

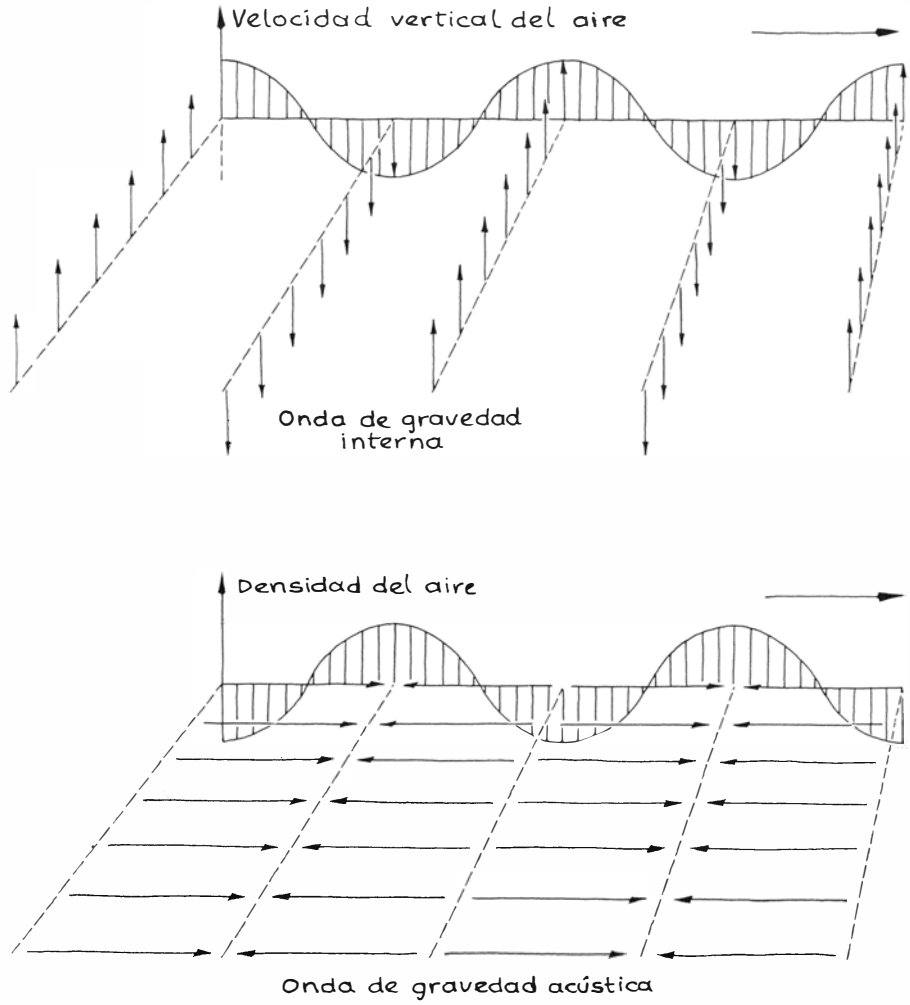
reflejada.) Lo importante aquí es que, pese a que en la ionosfera penetra una onda linealmente polarizada, se refleja una onda polarizada elípticamente. El campo magnético de tal onda describe también una elipse y, por consiguiente, será paralelo periódicamente a la antena del receptor de radio. Ese fenómeno determina que la señal reflejada genere respuesta en el receptor.

A lo largo del día las señales de radio se reflejan en un estrato de la ionosfera conocido como capa *D*. Situada a una altura comprendida entre 60 y 90 kilómetros, esta capa se caracteriza por densidades de gas elevadas y por concentraciones de electrones bajas en comparación con las de alturas mayores. Al ponerse el sol, en esta capa disminuye la concentración de electrones pues desaparece la radiación ultravioleta necesaria para producir los iones.

Por la noche, las señales se reflejan en la capa *E,* que se extiende desde los 90 hasta los 150 kilómetros aproximadamente. A través de toda esta capa *E* la temperatura aumenta con la altura, empezando por un mínimo cerca de los 85 kilómetros de altura, lugar que se conoce como mesopausa. Sobre la capa *E* está la capa *F,* que se extiende hasta una altura de unos 500 kilómetros.

Ya hace mucho tiempo que se vienen observando perturbaciones periódicas en las tres capas. En 1960 Colin O. Hines propuso que algunas perturbaciones de ésas podrían explicarse a través de ondas atmosféricas. No se conoce con precisión las características de esas ondas, especialmente en lo concerniente a su origen y energía. Su iniciación puede deberse a tormentas, vientos fuertes desviados por montañas, mareas, terremotos, los electrochorros auroral y ecuatorial, la corriente de chorro y calentamiento durante subtormentas aurorales y polares. Hay veces en que las ondas parecen estar canalizadas, es decir, ocluida su propagación horizontalmente entre dos fronteras, una situada debajo del canal y la otra encima. Puede ocurrir entonces que estas ondas dejen escapar energía hacia la región situada por encima del canal y provoquen así perturbaciones que se propagarán por la ionosfera en altitudes mayores.

Las ondas de gravedad que detecta el dispositivo de Kohl se llaman a veces ondas de gravedad internas, para distinguirlas de las ondas de gravedad acústicas. Se considera que estas ondas internas son transversales (en las que el aire oscila perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda)



Diferencia entre las ondas de gravedad interna y acústica

con un período comprendido entre 270 segundos y cuatro horas. Las ondas acústicas se consideran longitudinales (en las que el aire oscila paralelamente a la dirección de propagación de la onda) con un período inferior a 270 segundos. Ambos tipos de ondas pueden ser generados por perturbaciones atmosféricas a gran escala.

Las ondas de gravedad acústicas son ondas de compresión, como las ondas sonoras. Por otro lado las ondas de gravedad internas necesitan de la existencia de un gradiente de densidad atmosférica y, por tanto, no se dan a nivel del suelo. Pero, a mayores alturas, basta la disminución de densidad para servir de soporte a ondas de esta naturaleza. Así, cuando una porción de aire es desplazada, tanto su empuje de Arquímedes como su peso actúan para devolverla a su altura inicial. En efecto, si la porción es desplazada hacia abajo, el empuje de Arquímedes la impulsará de vuelta hacia arriba, y, si es desplazada hacia arriba, el peso la impulsará de vuelta hacia abajo. A través de este mecanismo, una perturbación atmosférica puede determinar que las bolsas de aire oscilen alrededor de sus alturas de equilibrio y sirvan de soporte a fenómenos de tipo ondulatorio que se propaguen a través de la atmósfera.

Con independencia de cómo surjan y se mantengan las ondas de gravedad, alterarán la concentración de los electrones responsables de la reflexión de las señales de radio de amplitud modulada. Por ello pueden detectarse y seguirse con el dispositivo de Kohl. Haciendo funcionar entre dos amigos dos sistemas de detección como el descrito, iguales y separados una gran distancia, podemos poner de manifiesto la propagación horizontal de estas ondas. Aunque la correlación entre ondas de gravedad y ciertos sucesos, grandes tormentas y erupciones solares por ejemplo, es díficil, puede que alguien desee intentarlo. El dispositivo de Kohl puede aplicarse también al estudio de otros fenómenos de ionización, la ionización irregular y transitoria conocida como *E* esporádica por ejemplo, que se supone resultado de la interacción entre el campo magnético terrestre y vientos de la capa *E*.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DESARROLLO ECONOMICO

CHARTER OF ECONOMIC RIGHTS AND DUTIES OF STATES. Resolución 3281 (XXIX) de la Asamblea General de las Naciones Unidas. Naciones Unidas, 1976.

NORTH-SOUTH: A PROGRAMME FOR SURVIVAL. Independent Commission on Industrial Development Issues. The MIT Press, 1980.

LOS DETERMINANTES DEL CRECIMIENTO ECONOMICO

SIX LECTURES ON ECONOMIC GROWTH. Simon Kuznets. The Free Press, Nueva York, 1959.

INTRODUCCION A LA TEORIA ECONOMICA DEL DESARROLLO. Walter Elkan. Alianza Editorial, Madrid, 1973.

EL NACIMIENTO del MUNDO OCCIDENTAL. UNA NUEVA HISTORIA ECONOMICA (900-1700). Douglas C. North y Robert Paul Thomas. Siglo XXI de España Editores, Madrid, 1978.

WORLD DEVELOPMENT REPORT. The World Bank, 1979.

POBLACION

PRIMARY HEALTH CARE: REPORT OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRIMARY HEALTH CARE. World Health Organization, 1978.

CAN HEALTH AN NUTRITION INTERVENTIONS MAKE A DIFFERENCE? Davidson R. Gwatkin, Janet R. Wilcox y Joe D. Wray. Overseas Development Council, 1980.

HEALTH, SECTOR POLICY PAPER. Fredrick Golladay. World Bank, 1980.

1979 REPORT: UNITED NATIONS FUND FOR POPULATION ACTIVITIES. Director ejecutivo adscrito a las Naciones Unidas, 1980.

ALIMENTACION

THE POLITICAL ECONOMY OF AGRARIAN CHANGE: AN ESSAY OF THE GREEN REVOLUTION. Harvard University Press, 1974.

THE MORAL ECONOMY OF THE PEASANT: REBELLION AND SUBSISTENCE IN SOUTHEAST ASIA. James C. Scott. Yale University Press, 1976.

FOURTH WORLD FOOD SURVEY. Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Naciones Unidas, 1977.

AGUA

WATER RESOURCES DEVELOPMENT AND MANAGEMENT PLANNING IN ARID ZONES: CASE HISTORY, ISRAEL. A. Wiener. Conferencia del Agua de las Naciones Unidas, Mar del Plata, marzo, 1977.

WATER DEVELOPMENT AND MANAGEMENT; PROCEEDINGS OF THE UNITED NATIONS WATER CONFERENCE. Dirigido por Asit K. Biswas. Pergamon Press, 1978.

ENERGIA

POPULATION OF THE WORLD AND ITS REGIONS, 1975-2050. Nathan Keyfitz. Institute for Applied Systems Analysis, en prensa.

POSSIBLE SHARE OF SOFT/DECENTRALIZED RENEWABLES IN MEETING THE FUTURE DEMAND OF WORLD REGIONS. A. M. Khan. International Institute of Applied Systems Analysis, en prensa.

DESARROLLO ECONOMICO DE CHINA

FANSHEN: A DOCUMENTARY OF REVOLUTION IN A CHINESE VILLAGE. William Hinton. Monthly Review Press, 1966.

CHINA'S ECONOMIC REVOLUTION: THE INTERPLAY OF SCARCITY AND IDEOLOGY. Alexander Eckstein. University of Michigan Press, 1975.

THE UNITED STATES AND CHINA. John King Fairbank. Harvard University Press, 1979.

DESARROLLO ECONOMICO DE LA INDIA

SOCIETY AND CHANGE: ESSAYS IN HONOUR OF SACHIN CHAUDHURI. Dirigido por K. S. Krishnaswamy. Sameeksha Trust, Oxford University Press, 1977.

INDIA'S POLITICAL ECONOMY, 1947-77; THE GRADUAL REVOLUTION. Francine R. Frankel. Princeton University Press, 1978.

DEAFT SIX FIVE-YEAR PLAN, 1978-83 (Revisión). Comisión de Planificación del Gobierno de ia India, 1979.

DESARROLLO ECONOMICO DE TANZANIA

FREEDOM AND DEVELOPMENT/UHURU NA MAENDELEO. Julius K. Nyerere. Oxford University Press, 1973.

UNDERDEVELOPMENT AND INDUSTRIALIZATION IN TANZANIA. J. Rweyemamu. Oxford University Press, 1973.

TOWARDS UJAMAA. Dirigido por Gabriel Ruhumbika. East African Literature Bureau, 1974.

ECONOMIC SURVEY 1977/78. Gobierno de Tanzania. Imprenta gubernamental, 1978.

PAPERS ON THE POLITICAL ECONOMY OF TANZANIA. Dirigido por K. Kim, R. Mabele y M. Schultheis. Heinemann Educational Books, 1979.

DESARROLLO ECONOMICO DE MEXICO

EL PROLETARIADO AGRICOLA EN MEXICO. Luisa Pare. Siglo XXI Editores, S. A., 1977.

LA CRISIS ECONOMICA: EVOLUCION Y PERSPECTIVAS. Pablo González Casanova y Enrique Florescano en *México, Hoy*. Siglo XXI Editores, S. A., 1979.

LA POLITICA ECONOMICA EN MEXICO: 1970-76. Carlos Tello. Siglo XXI Editores, S. A., 1979.

LA ECONOMIA MUNDIAL EN EL AÑO 2000

INPUT-OUTPUT ECONOMICS. Wassily Leontief. Oxford University Press, 1966.

THE FUTURE OF THE WORLD ECONOMY: A UNITED NATIONS STUDY. Wassily Leontief, Ann P. Carter y Peter A. Petri. Oxford University Press, 1977.

JUEGOS MATEMATICOS

THE MEANING OF THE GLORIOUS KOURAN. Mohammed Marmaduke Pickthall. New American Library, 1953.

PATTERNS IN PRIMES. Leslie E. Card en *Journal of Recreational Mathematics,* vol. 1, n.º 2, págs. 93-99; abril, 1968.

TALLER Y LABORATORIO

INTERNAL ATMOSPHERIC GRAVITY WAVES AT IONOSPHERIC HEIGHTS. C. O. Hines en *Canadian Journal of Physics,* vol. 38, n.º 11, págs. 1441-1481; noviembre, 1960.

ATMOSPHERIC WAVES AND THE IONOSPHERE. Tom Beer en *Contemporary Physics,* vol. 13, n.º 3, págs. 247-271; mayo, 1972.

ATMOSPHERIC WAVES. Tom Beer. John Wiley & Sons, Inc., 1974.

Taller y laboratorio

Un láser casero de vapor de mercurio emite, a la vez, verde y anaranjado

Jearl Walker

Dean Morelli, de Rye, New York, cuyo espectrómetro de fabricación casera les describí en mi artículo de marzo pasado, ha ideado un procedimiento para que los aficionados puedan construirse un láser de vapor de mercurio ionizado. El láser de Morelli emite pulsos muy intensos de luz verde (de 567,7 nanómetros de longitud de onda) y otros pulsos más débiles de luz anaranjada (de 615 nanómetros). Este tipo de láser difiere de los otros en varios puntos. Se trata del primer láser de iones gaseosos y su ganancia y la anchura de su haz son desacostumbradamente grandes en un láser que emite luz visible. (Y, en realidad, fue con un láser de este tipo con el que se puso de manifiesto por primera vez la posibilidad de obtener ganancias y potencias elevadas dentro del espectro visible.) Sus emisiones próximas a los 615 nanómetros son casi monocromáticas puras, es decir, las frecuencias y longitudes de onda varían en dicha zona entre límites muy estrechos, por lo cual este aparato podría servir como patrón de frecuencias. En muchos aspectos, la construcción de un láser de Morelli es más fácil que la de un láser de helio-neón.

La ganancia de un láser constituye una medida de la amplificación de la intensidad luminosa por dicho haz (mediante la emisión estimulada) respecto a sus pérdidas (por dispersión, difracción y absorción). Para el verde, la ganancia del láser de Morelli está probablemente en torno al 50 por ciento por metro a lo largo del tubo del aparato. Entre los espejos de láser, la intensidad de la luz es muy elevada. Colocando el objeto a estudiar dentro de la cavidad del láser, donde está sometido a una luz muy intensa, podemos efectuar varios experimentos de espectroscopía. (La parte del haz que emerja del láser podrá incluso aprovecharse para otros experimentos.)

El tubo del láser de Morelli contiene vapor de mercurio. El láser se excita eléctricamente mediante una descarga de alta tensión a través del tubo. Cuando uno de los electrones de la descarga choca con un átomo de mercurio, éste pierde un electrón: se tiene entonces un átomo de mercurio ionizado en un nivel energético excitado. Los iones de mercurio pueden excitarse hasta distintos niveles energéticos, comenzando por los que caen espontáneamente a niveles más bajos, emitiendo luz cuando ello ocurre. Esta luz constituye la luminiscencia, pero no el haz, que desprende el tubo del láser. Parte de los iones estarán excitados en un nivel energético que es el significativo por lo que al funcionamiento del láser respecta (el nivel denominado $5f^2F^0{}_{7/2}$ en espectroscopía). Todo ion que se encuentre en dicho nivel puede emitir un fotón de una longitud de onda de 567,7 nanómetros si cae al nivel energético inferior $6d^2D_{5/2}$.

Algunos de los fotones emitidos de esta forma se mueven a lo largo del eje del tubo del láser. Cuando uno se cruza con otros iones de mercurio que estén en el nivel $5f^2F^0{}_{7/2}$, el campo eléctrico del primero puede estimular en los segundos la misma transición descendente. En cada transición se emite otro fotón, que es idéntico al anterior en fase, longitud de onda asociada y dirección de movimiento. Así, en el momento en que el primer fotón alcanza el extremo del tubo habrá estimulado la emisión de un gran número de fotones iguales a él.

Llegados aquí, la descripción de la emisión estimulada suele hacerse más clara pasando de la representación de la luz mediante fotones a la descripción ondulatoria. Se dice que las ondas luminosas generadas en una emisión estimulada son coherentes porque se propagan en la misma dirección, tienen la misma longitud de onda y están en fase. Por tanto, se interfieren constructivamente, en virtud de lo cual se refuerzan entre sí y producen de esta suerte una onda de gran amplitud, lo que significa que la luz será muy intensa.

Las ondas luminosas se reflejan alternativamente, una y otra vez, a través del tubo de mercurio en los espejos colocados en sus extremos; ello estimula aún más las emisiones a la longitud de onda de 567,7 nanómetros. Parte de la luz atraviesa los espejos para formar el haz de láser exterior. ¿Qué ocurre con el resto de la luz emitida por los átomos de mercurio del tubo, tanto los no ionizados como los simplemente ionizados que no participan en la emisión estimulada? Cada átomo de éstos se halla en un nivel energético inadecuado o bien emite luz espontáneamente antes de que lo estimule un fotón que se cruce con él. La luz producida por estos átomos sale del tubo en todas direcciones y contribuye a su luminiscencia. Se trata de luz incoherente, lo que significa que las ondas emitidas no tienen todas la misma longitud de onda, ni se desplazan en la misma dirección ni están en fase.

La mayoría de los niveles energéticos alcanzados por los átomos de mercurio simplemente ionizados no participan en el efecto láser debido a que, por término medio, los iones permanecen en tales niveles un tiempo demasiado corto. Para que una determinada transición entre niveles energéticos contribuya al efecto láser, en el nivel superior debe haber más átomos que en el inferior. Esta situación se llama inversión de población.

Supongamos ausencia de inversión de población, de forma que, para un par de niveles, habrá más átomos en el inferior que en el superior. Aun así, la transición descendente fortuita de un átomo podría enviar un fotón a lo largo del tubo y este fotón podría producir una emisión estimulada al cruzarse con un ion de mercurio que estuviera en el nivel superior. Sin embargo, al no haber inversión, lo más probable es que los fotones estimulados encuentren átomos en el nivel inferior y no en el superior, y todo fotón que se cruce con un átomo en el nivel inferior será absorbido por éste. En ese caso, predomina la absorción y el resultado es la ausencia de efecto láser.

Para que sea posible la inversión de población ha de existir un nivel energético en el que los átomos puedan permanecer durante un tiempo largo en proporción a la duración de su vida en un nivel inferior hacia el que puedan caer. Los átomos del nivel inferior caen a niveles aún más bajos muy rápidamente, dejando vacío el nivel que ocuparon y relativamente lleno el más alto de todos; el resultado es la inversión de población.

Láser de vapor de mercurio ionizado construido por Dean Morelli

Electrodos de neon recubiertos; diámetro exterior, 15 mm.

15 cm. (aprox.)

Toma de vacío; long., 4 cm; diam. ext., 7 mm.

Ventana de Brewster de cuarzo soldada; dimensiones, 25 × 35 × 1 mm.

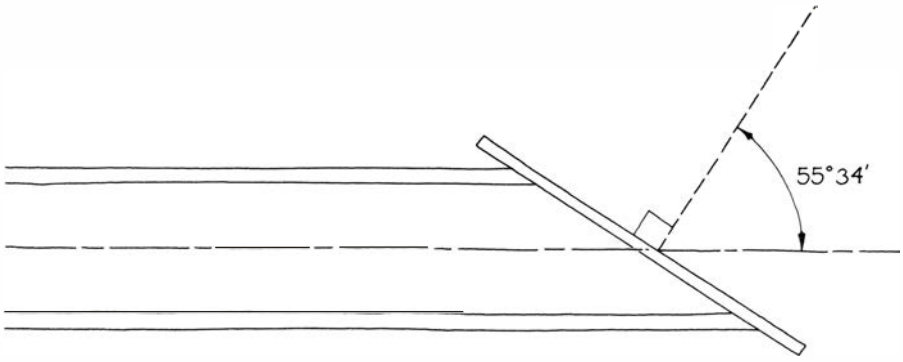
Tubo de 15 mm; espesor tipificado

Copa del mercurio; longitud, 2 ÷ 2,5 cm; diam. ext, 7 ÷ 8 mm.

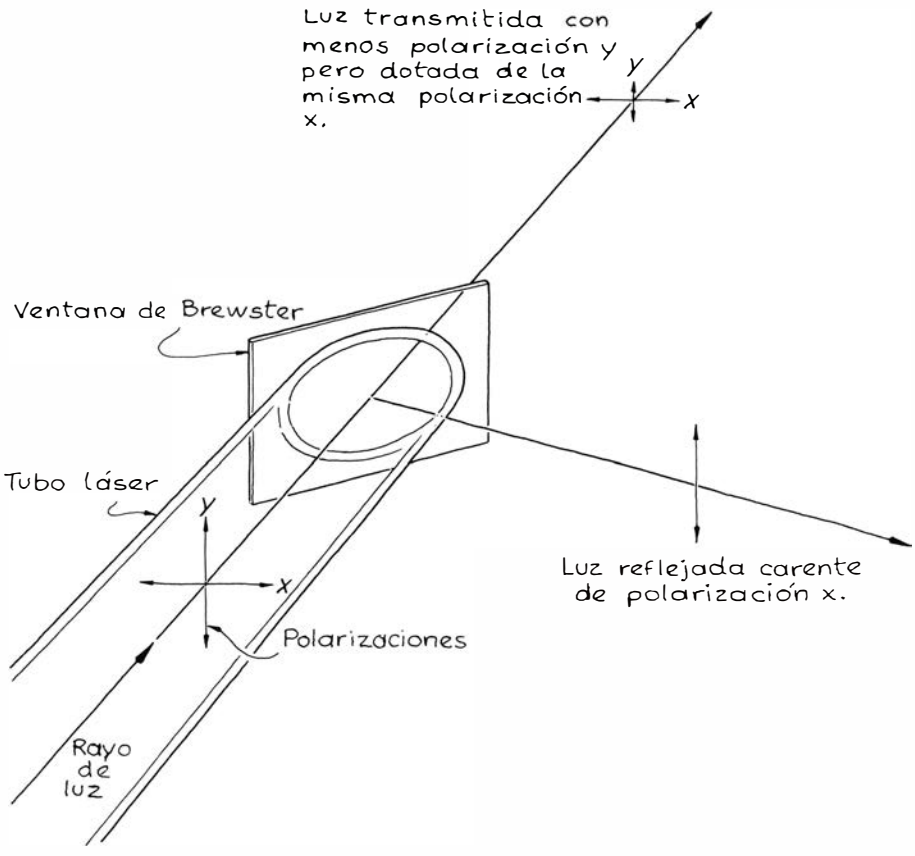
107 cm.

122 cm.

Características del tubo de descarga



Angulo de la ventana de Brewster



Efecto de la ventana de Brewster sobre la polarización

El nivel energético del ion de mercurio simplemente ionizado, capaz de originar luz láser de 615 nanómetros, es el denominado $7p^2P^0_{3/2}$ y la transición se hace al nivel $7s^2S_{1/2}$. Parte de la luz estimulada atraviesa un espejo para formar otro haz de láser que se encuentra en la región anaranjada del espectro visible.

En las condiciones correctas, el láser de Morelli emite ambas longitudes de onda (567,7 y 615 nanómetros) simultáneamente y los dos colores pueden separarse haciendo pasar el haz de salida del láser a través de un prisma. Sin embargo, la componente anaranjada es relativamente débil y por ello Morelli ha proyectado su láser pensando en la componente verde.

Morelli construyó el tubo de su láser a partir de una tubería de pirex de longitud tipificada (122 centímetros) y espesor tipificado, cuyo diámetro exterior es 15 milímetros. De otra tubería pirex cortó una longitud de 7,5 centímetros y la soldó a estanqueidad al tubo largo, a 7,5 centímetros de uno de los extremos de éste y formando ángulo recto. Para soldar empleó un soplete de oxígeno. Al extremo abierto del tubo corto fusionó un electrodo de lámpara de neón de 15 mm de diámetro. De la misma forma, montó otro electrodo en el extremo opuesto del tubo largo.

Seguidamente, a uno de los tubos de electrodo unió un trozo de tubería de 4 centímetros de longitud y 7 milímetros de diámetro exterior para que sirviese como toma de vacío. Otro trozo de este tubo de 7 milímetros lo fusionó al centro del tubo más largo por el lado opuesto a los electrodos. Este trozo, de 2,5 centímetros de longitud, constituiría la fuente de vapor de mercurio.

Si no se dispone de soplete de oxígeno, el montaje puede hacerse con tubería de vidrio sodocálcico, que puede fundirse con un soplete de propano como los que se venden en las ferreterías. En la bibliografía citaremos dos libros que resultan especialmente provechosos: *Creative Glass Blowing,* para los trabajos con vidrio, y *Light and Its Uses,* que ofrece indicaciones y consejos para la construcción de láseres.

Utilizando sendas ventanas de Brewster, construidas con vidrio plano de gran calidad óptica, Morelli cerró herméticamente los extremos del tubo largo. Estas dos piezas han de montarse sobre el tubo con el ángulo exacto para minimizar las pérdidas que sufre la luz al reflejarse en las ventanas. El ángulo es el formado por el eje del tubo y una recta perpendicular a la superficie de la ventana.

Este ángulo de Brewster, que así se llama, es igual al arco tangente del índice de refracción de la ventana y ejerce un influjo determinante sobre la polarización de la luz. Al comenzar el efecto láser, la luz incidente sobre la ventana no está polarizada; sin embargo, y merced al ángulo de Brewster, hay un sentido de polarización que resulta reforzado y que rápidamente llega a predominar en el proceso.

Supongamos un rayo de luz no polarizada que incida sobre una ventana de Brewster. Aquí el campo eléctrico luminoso oscilará a lo largo de todos los ejes posibles contenidos en un plano perpendicular al rayo. Resulta muy útil imaginar que las oscilaciones se efectúan a lo largo de dos ejes perpendiculares. Uno de ellos, el eje *x,* está en el plano definido por los rayos incidente y reflejado. El otro, eje *y,* es perpendicular al *x.* En razón de la geometría particular de la ventana de Brewster, la luz reflejada en su superficie está polarizada por completo en la dirección *y.* Esta luz sale del tubo al reflejarse y ya no contribuye al efecto láser. La luz polarizada según el eje *x* no se refleja en absoluto, por lo que atraviesa la ventana y es devuelta a través del tubo por uno de los espejos. De esta manera, la luz con polarización *x* llega a predominar en todo el efecto láser; la luz generada por emisión estimulada estará, pues, polarizada casi por completo, con lo que se evitará la reflexión en las ventanas y la luz que se pierda en éstas será muy poca.

Morelli empleó ventanas de cuarzo, cuyo índice de refracción para la longitud de onda de 567,7 nanómetros es 1,459. El arco tangente de 1,459 es 55 grados y 34 minutos y, por tanto, este fue el ángulo de montaje de las ventanas de Brewster. (La emisión de 615 nanómetros no llega a la ventana bajo el ángulo exactamente correcto, ya que la longitud de onda es más larga y le corresponde un índice de refracción ligeramente menor. No obstante, el ángulo de Brewster es casi igual para ambas longitudes de onda y, por ello, el láser puede trabajar a 615 nanómetros.)

Morelli preparó los extremos del tubo para recibir las ventanas aserrándolos a un ángulo complementario del de Brewster, o sea, 34 grados y 26 minutos. Este trabajo lo realizó con una sierra para metales dotada de una hoja de latón de 0,6 milímetros de grueso y manteniendo el tubo y un par de guías para la hoja de la sierra en una caja de ingletes. Como lubricante empleó abrasivo del número 120 mezclado con agua. Morelli recalca que la sierra debe moverse lenta y cuidadosamente para que no se astillen los bordes del vidrio, lo que originaría pérdidas de gas durante el funcionamiento del aparato.

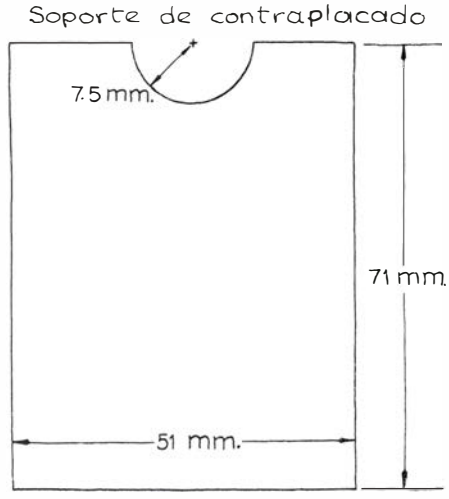
Aserrado una mitad, se da la vuelta al tubo para terminar el resto del corte. Se pulen luego los bordes hasta dejarlos planos amolándolos contra un útil de vidriero alimentado sucesivamente con abrasivo cada vez más fino (el último y más fino de los cuales será del n.º 600). Los cortes no deben desviarse en más de medio grado del ángulo complementario del Brewster.

Finalizados el corte y el pulido, Morelli limpió el tubo y lo montó en su soporte. Con un cuentagotas introdujo entonces algunas gotas de mercurio en la copa, para lo cual inclinó el tubo ligeramente y con cuidado dejó que las gotas se deslizaran por el interior. Este mercurio ha de ser muy puro; él empleó mercurio tridestilado.

Una vez que el mercurio está en su sitio, se sumerge la copa en una cubeta llena de hielo seco y etanol hasta que el metal se congela. Después, la toma de vacío del tubo se conecta a una bomba de vacío. Con ésta en marcha, se sujetan las ventanas cuidadosamente contra los bordes del tubo. (Puede que aquí sea necesario un ayudante.) Si los extremos del tubo están suficientemente planos, la aspiración de la bomba sujetará firmemente las ventanas. A la menor fuga habrá que insistir en el pulido para que los bordes queden más planos. Si el contacto es hermético, las ventanas podrán encolarse en el tubo. Para ello, Morelli se sirvió de una jeringa hipodérmica desechable dotada de una aguja de calibre grande, con la que aplicó una capa de epoxia alrededor de las uniones de las ventanas con el tubo. La aspiración debe mantenerse hasta que la masilla se endurezca.

Como base para el tubo y los espejos empleó un trozo de tubería de aluminio rectangular de unos 183 centímetros de longitud, con una sección recta de 10 por 4,5 centímetros y 3 milímetros de espesor. Esta pieza es un trozo de tubería de las que se emplean en carpintería metálica. Como sostén del tubo utilizó dos soportes de madera cortados de una pieza de contraplacado de 2 centímetros de grueso y después aplicó epoxia entre los soportes y la base y entre los soportes y el tubo. (Para aplicar la epoxia al aluminio, Morelli preparó la superficie de éste restregándola con un cepillo de dientes empapado en un polvo limpiador abrasivo y prosiguió en este trabajo hasta que el agua depositada sobre el metal formaba una capa delgada sin tendencia alguna a globularse.)

Cada espejo se instaló en una montura ajustable mediante tres tuercas moleteadas. Para centrar los espejos con el tubo láser, Morelli siguió un procedimiento muy corriente en el que se emplean dos tarjetas de archivo, una pequeña lámpara portátil y un portaobjetos de microscopio que hace de separador de haz. En cada tarjeta

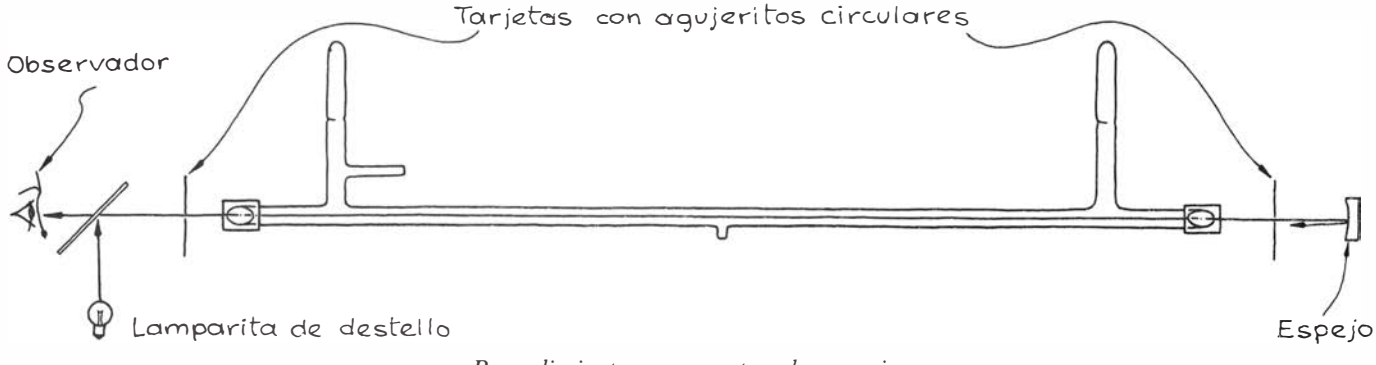


Soporte de madera para el tubo de descarga

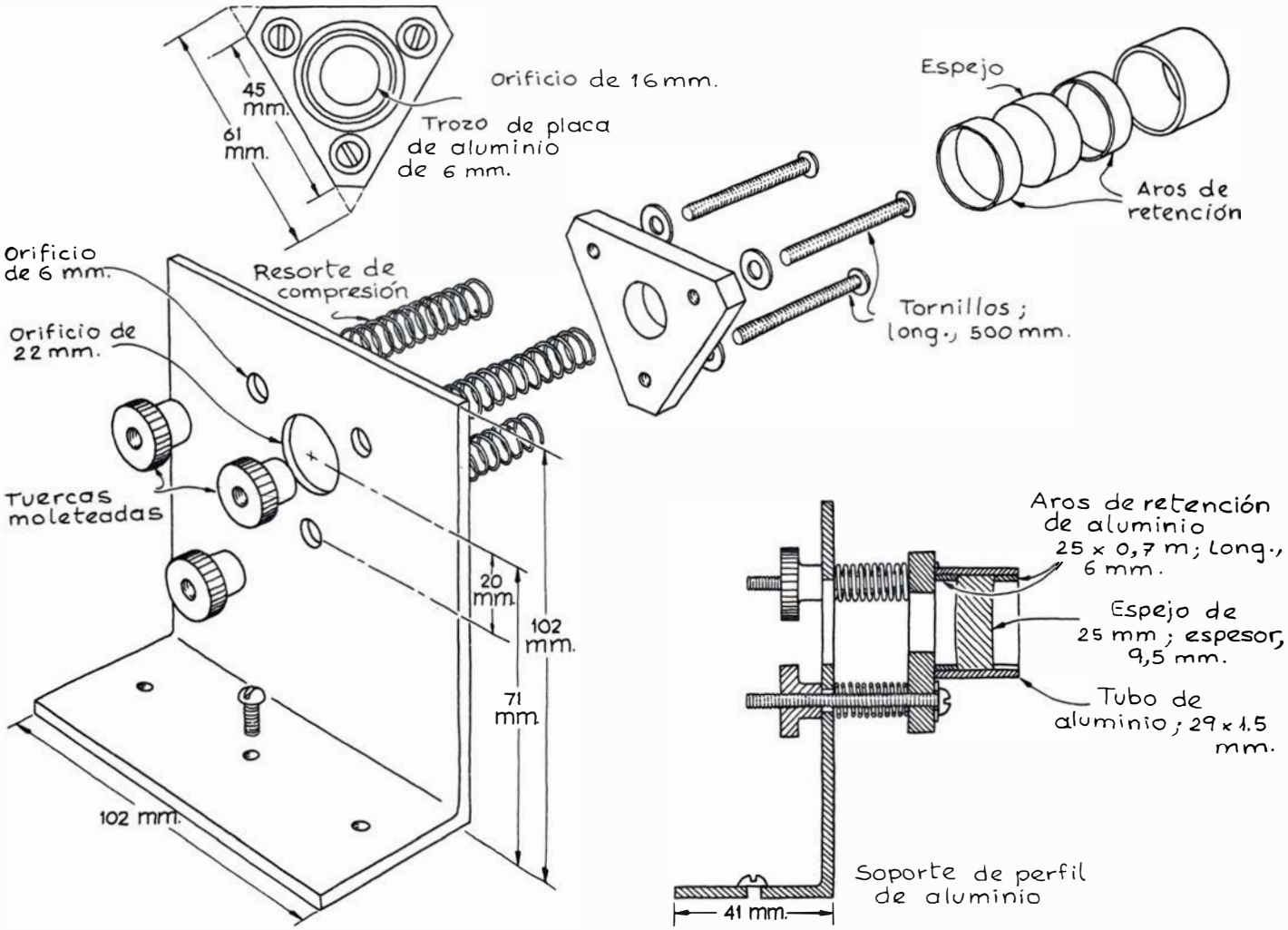
practicó un agujero circular y fijó una a cada extremo del tubo, de suerte que los agujeros quedaran alineados con el tubo. El separador de haz lo colocó entre un espejo y el extremo del tubo correspondiente, formando un ángulo de 45 grados con el eje de éste. Además retiró la montura de este espejo con el fin de que pudiera observarse el espejo del extremo opuesto mirando a través del tubo.

Situó la lámpara, que debe tener un bulbo de filamento pequeño, junto al portaobjetos para que la luz se reflejase en éste y entrase en el tubo pasando por el agujero de la tarjeta más próxima. Ajustó, luego, los tornillos del espejo lejano (esto lo hará un ayudante, si se dispone de él) hasta que la luz se reflejó regresando al observador, cuya visual se dirigía a través del tubo. Obtuvo un centrado correcto cuando la intensidad de la luz procedente del espejo lejano era máxima.

Separó entonces esa montura de la base, sin alterar los tornillos de ajuste, de manera que al volver a instalarla siguiera estando ajustada. Morelli centró el otro espejo por el mismo procedimiento.



Procedimiento para centrar los espejos



Detalles de la montura de un espejo

Los espejos, esféricos, poseen el mismo radio; se colocan separados una distancia algo menor que un radio (disposición llamada cavidad confocal). Su radio de curvatura mide 147 centímetros, 25,4 el diámetro y 9,5 milímetros su espesor. El reverso de ambos está amolado en forma convexa. Su separación es del orden de 140 centímetros. (Las superficies exteriores podrían haber sido planas si se hubiera empleado una lente para colimar el haz emergente. Incluso hubieran podido ser planas las superficies interiores, pero los sistemas de espejos esféricos son más fáciles de centrar que los de espejos planos.)

Cada espejo se montó en un tubo de aluminio de 29 milímetros de longitud y 1,5 milímetros de espesor. El tubo se afirmó, con epoxia, a una placa triangular, y ésta se sujetó a una placa soporte con tres tornillos. En el interior del tubo se introdujo y se pegó en posición un aro de retención de aluminio de 25,4 milímetros de ancho por 6 milímetros de largo. Se introdujeron luego el espejo y otro aro. A fin de mantener en posición este aro, Morelli utilizó cinta transparente ya que, según hace notar, no conviene pegarlo, pues los espejos han de sacarse de vez en cuando para limpiarlos.

Los espejos que habitualmente se instalan en los láseres que emiten luz visible tienen varias películas dieléctricas delgadas pensadas para aumentar la reflectividad en una longitud de onda determinada. Los espejos empleados por Morelli estaban preparados para ofrecer la mejor reflexión a la longitud de onda de 567,7 nanómetros. Así, la película delgada contigua al vidrio tenía un índice de refracción superior al del vidrio y su anchura óptica era un cuarto de la longitud de onda designada.

Por encima de esta película hay otra capa de menor índice de refracción. Sobre éstas se añaden más capas, de índices de refracción alternativamente mayores y menores, con la exigencia de que la capa externa de cada pareja tenga el índice mayor. Cada una de estas capas refleja parte de la luz. Entonces, con este sistema, todos los rayos reflejados se interfieren constructivamente, proporcionando una reflexión intensa. Un espejo de éstos suele reflejar hasta el 99,8 por ciento de la luz que le llega, pero sin los recubrimientos la reflectividad sería considerablemente menor.

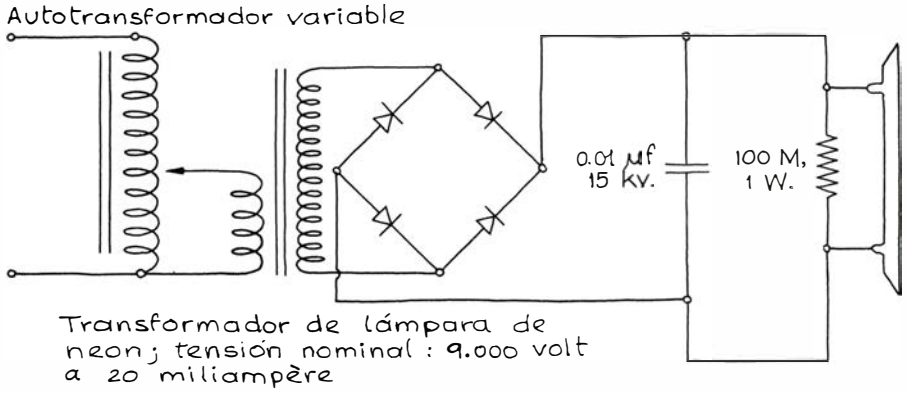
El espectro de longitudes de onda reflejado por un espejo depende del valor relativo de los índices de refracción de las películas de dieléctrico. Los espejos de Morelli reflejan aproximadamente el 99,5 por ciento de la luz para la longitud de onda de 567,7 nanómetros. El intervalo de reflectividad abarca aproximadamente unos 100 nanómetros de anchura espectral e incluye la emisión de 615 nanómetros que también puede observarse con este láser. No obstante, Morelli señala que, para esta longitud de onda, la reflexión es de bastante mala calidad, hasta el punto de que la emisión puede resultar muy débil o no aparecer.

El láser se activa mediante una descarga de alta tensión a través del tubo. Un autotransformador variable alimenta de corriente al arrollamiento

primario de un transformador de lámpara de neón de 9000 volt de tensión nominal (para 20 miliampère). La salida de este transformador se rectifica en un puente de cuatro diodos y luego se alimenta a un condensador en paralelo con el tubo. Cuando la diferencia de potencial entre los electrodos del tubo alcanza unos 5000 volt, el gas del tubo se ioniza; ello significa que puede conducir la electricidad, permitiendo que el condensador se descargue a través del tubo. Este arco de elevada intensidad dura alrededor de un microsegundo y, según sea el reglaje del autotransformador, la descarga puede repetirse con una frecuencia de hasta varios centenares de veces por segundo. Con una repetición tan rápida, la emisión de láser se diría que es un haz estacionario.

La capacidad del condensador debe ser de 0,01 microfarad aproximadamente y de 15 kilovolt su tensión de ruptura. Morelli lo construye a partir de un trozo de tarjeta de circuito impreso de dos caras. El área de la superficie de tarjeta necesaria (en metros cuadrados) está determinada por la fórmula $a = ct/d\epsilon_o$, donde ϵ_o es $8{,}85 \times 10^{-12}$ farad por metro, c representa la capacidad en farad, t simboliza el espesor del dieléctrico en metros y d es la constante dieléctrica del material aislante. La constante dieléctrica del material vítreo-epoxídico de la tarjeta de circuito impreso vale 4,8 y su tensión de ruptura es de 95 kilovolt por milímetro de espesor.

Por ataque químico, Morelli eliminó un centímetro del cobre existente a lo largo de ambas caras del perímetro de la tarjeta, con el fin de evitar la formación de arco en dicha zona. Luego tanteó experimentalmente para determinar cuál sería la mejor superficie de la tarjeta. Cuanto mayor es la superficie, mayor es la capacidad óptima. La capacidad es menor para la salida más intensa de 567,7 nanómetros que para el haz de 615 nanómetros.



Circuito de alimentación

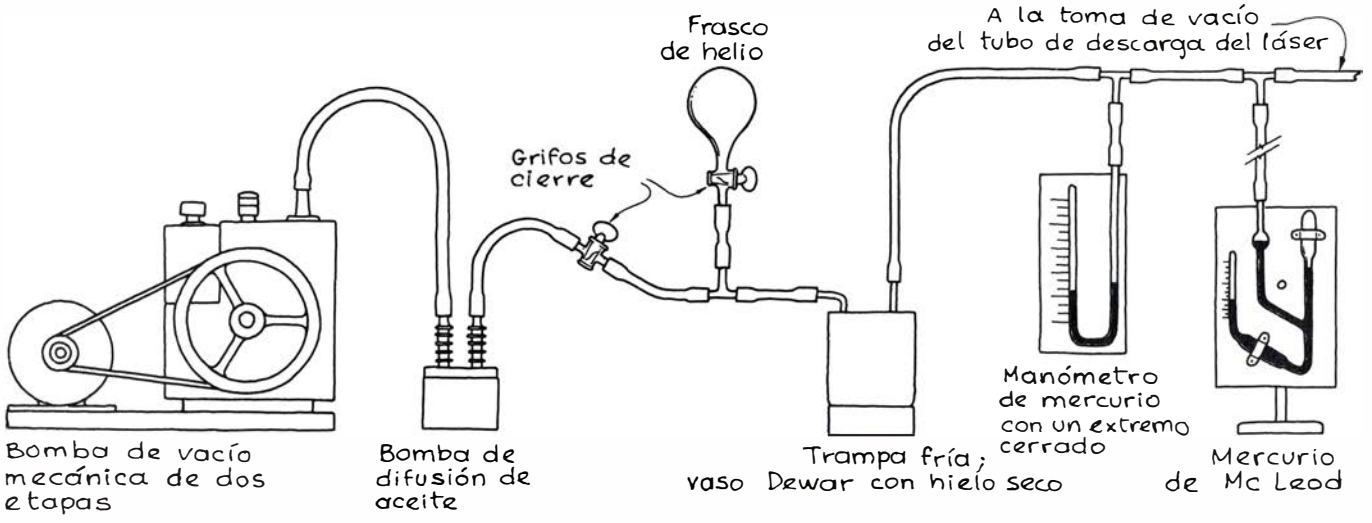
Los dos electrodos deben protegerse del bombardeo de electrones que reciben cuando el arco eléctrico discurre por el tubo. Morelli consiguió electrodos comerciales recubiertos de una mezcla de carbonato de estroncio y bario suspendida en un aglutinante de nitrocelulosa. Tras haber sellado el tubo del láser calentó los electrodos con el fin de convertir el recubrimiento en una capa protectora. Para el calentamiento se sirvió de una bobina introducida por el exterior del tubo del electrodo y excitada por un oscilador de alta frecuencia. La corriente oscilante de la bobina inducía una corriente oscilante en el electrodo. En paralelo con la bobina colocó un condensador variable para poner en resonancia el oscilador con el sistema condensador-bobina. La potencia nominal del oscilador debe ser de 50 watt como mínimo.

El calentamiento de los electrodos descompuso la nitrocelulosa, liberando hidrocarburos gaseosos, y los carbonatos se convirtieron en óxidos, liberando anhídrido carbónico. Los óxidos protegen los electrodos de la corriente de arco. Aquellas reacciones dieron además lugar a bario y estroncio metálicos que actúan como "degasificadores", eliminando del tubo gases activos e indeseables.

El circuito de vacío utilizado por Morelli consistía en una bomba de vacío mecánica de dos etapas, una bomba de difusión, un manómetro de mercurio de extremo cerrado, un manómetro de Mac Leod, una trampa fría, un frasco con helio y dos grifos de cierre. El sostiene que la bomba de difusión es útil, pero no imprescindible. Los planos de los manómetros se ofrecen en *Creative Glass Blowing*. Más instruciones acerca de éstos y de otros componentes del circuito de vacío aparecen en *Light and Its Uses* (léanse también los capítulos dedicados a los láseres de helio-neón y de argón).

Lo primero que hizo Morelli al poner en marcha el circuito de vacío fue congelar el mercurio contenido en la copa central. Arrancó después las bombas y comenzó a calentar el tubo del láser con un mechero Bunsen para eliminar las moléculas de gas adheridas a sus paredes, poniendo buen cuidado en no calentar las ventanas de Brewster ni el mercurio contenido en la copa.

Una vez preparados los electrodos



Circuito de vacío

con su recubrimiento de óxido, Morelli los conectó a la salida de corriente alterna del transformador de lámpara de neón. Después introdujo helio en el tubo a la presión de algunos torr, con lo que se formó una descarga luminiscente que limpió el interior del tubo. Este helio se bombeó al exterior y se introdujo helio nuevo, repitiéndose el proceso hasta que la descarga generó una luminiscencia rosa. Entonces se ajustó la presión del helio entre 0,5 y un torr, se introdujo la copa de mercurio en una cubeta con agua a 40 grados centígrados y se conectaron los electrodos a la fuente de alimentación de pulsos.

Una vez que el mercurio se haya difundido por el interior del tubo, se ajustan los espejos hasta que el láser comience a funcionar, al menos en la región del verde. Para que la salida sea máxima deben hacerse varios ajustes. Las monturas de los espejos pueden necesitar otros ajustes más. Por su parte, el operador puede hacer variar la presión del gas, la temperatura de la copa del mercurio y la capacidad del condensador de la fuente de alimentación.

Morelli sugiere que periódicamente se inviertan los cables de los electrodos, de manera que éstos intercambien sus papeles como ánodo y cátodo. Con esto se evita que sea uno de los electrodos el que reciba siempre el bombardeo de electrones y, además, que el helio se impulse únicamente hacia uno de los extremos del tubo. La presión del gas disminuirá gradualmente a medida que parte del helio quede sepultado por material de los electrodos pulverizado. Tras varias horas de funcionamiento hay que reponer el helio.

No voy a extenderme sobre la peligrosidad potencial de los láseres. Casi todo el mundo sabe que, si un haz de láser penetra en el ojo, puede causar una lesión permanente en la retina; pero el peligro se encierra también en las reflexiones esporádicas del haz sobre objetos de la habitación. Hay que andar con cuidado con las corrientes de elevada intensidad que se desarrollan en la fuente de alimentación, peligro que se agudiza especialmente si se trabaja con el láser en una oscuridad parcial que impida la visión completa del circuito. Hay que aislar todos los cables exteriores. Préstese atención también al manejo del mercurio, pues éste no sólo se evapora a altas temperaturas, sino también a la del recinto, y su vapor es venenoso. Por ello, al cargar el mercurio en la copa se comprobará previamente que la habitación esté bien ventilada.

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

FISICA Y TECNOLOGIA DEL REACTOR DE FUSION

ASPEKTE DER ENERGIEVERSORGUNG MIT FUSIONSREAKTOREN. Bünde et al. en *Brennstoff-Wärme-Kraft,* vol. 26, n.º 11, 1974.

A FUSION POWER PLANT. Dirigido por R. G. Mills. Princeton Plasma Physics Laboratory, MATT-1050, 1974.

THE TECHNOLOGICAL REQUIREMENTS FOR POWER BY FUSION. D. Steiner en Proceedings of the IEEE, vol. 63, n.º 11; noviembre, 1975.

CONCEPTUAL DESIGN OF A TOKAMAK REACTOR. KFA Jülich. Technical Commitee Meeting and Workshop on Fusion Reactor Design, 10-21 de octubre de 1977. Universidad de Wisconsin, Madison, Estados Unidos.

EL CURIOSO ESPECTRO DE SS 433

A KINEMATIC MODEL FOR SS 433. George O. Abell y Bruce Margon en *Nature,* vol. 279, n.º 5715, págs. 701-703; 21 de junio de 1979.

ENORMOUS PERIODIC DOPPLER SHIFTS IN SS 433. Bruce Margon, Holland C. Ford, Steven A. Grandi y Remington P. S. Stone en *Astrophysical Journal Letters,* vol. 233, n.º 2, 2.ª parte, págs. L63-L68; 15 de octubre de 1979.

DOES ANYONE UNDERSTAND SS 433? Dennis Overbye en *Sky and Telescope,* vol. 58, n.º 6, págs. 510-516; diciembre, 1979.

ANTICUERPOS MONOCLONALES

LYMPHOCYTE HYBRIDOMAS. Dirigido por F. Melchers, Basel M. Potter y N. Warner. *Current Topics in Microbiology and Immunology,* vol. 81, 1978.

HYBRID MYELOMA MONOCLONAL ANTIBODIES AGAINST MHC PRODUCTS. Dirigido por Göran Möller. *Immunological Reviews,* vol. 47, 1979.

MONOCLONAL ANTIBODIES AND CELL SURFACE ANTIGENS. C. Milstein, G. Galfré, D. S. Secher y T. Springer en *Ciba Foundation Symposia,* n.º 66, págs. 251-276; 1979.

LAS CAUSAS DEL COLOR

THE ORIGINS OF COLOR IN MINERALS AND GEMS. K. Nassau en *Lapidary Journal,* vol. 29, págs. 920-928, agosto; págs. 1060-1070, septiembre; págs. 1250-1258, octubre y página 1521, noviembre, 1975.

THE ORIGINS OF COLOR IN MINERALS. Kurt Nassau en *The American Minerologist,* vol. 63, n.º 3/4, págs. 219-229; marzo/abril, 1978.

LOS APALACHES MERIDIONALES Y EL CRECIMIENTO DE LOS CONTINENTES

LITHOSPHERE PLATE: CONTINENTAL MARGIN TECTONICS AND THE EVOLUTION OF THE APPALACHIAN OROGEN. John M. Bird y John F. Dewey en *Geological Society of America Bulletin,* vol. 81, n.º 4, págs. 1031-1060; abril, 1970.

TECTONICS OF THE WESTERN PIEDMONT AND BLUE RIDGE, SOUTHERN APPALACHIANS: REVIEW AND SPECULATION. Robert D. Hatcher, Jr., en *American Journal of Science,* vol. 278, n.º3, págs. 276-304; marzo, 1978.

THIN-SKINNED TECTONICS IN THE CRYSTALLINE SOUTHERN APPALACHIANS: COCORP SEISMIC-REFLECTION PROFILING OF THE BLUE RIDGE AND PIEDMONT. Frederick A. Cook, Dennis S. Albaugh, Larry D. Brown, Sidney Kaufman, Jack E. Oliver y R. D. Hatcher, Jr., en *Geology,* vol. 7, n.º12, págs. 563-567; diciembre, 1979.

TOMOGRAFIA DE EMISION DE POSITRONES

FATTY ACID UPTAKE AND "METABOLIC IMAGING" OF THE HEART. Milton S. Klein y Burton E. Sobel en *Cardiovascular Clinics,* vol. 10, n.º 2, págs. 165-176; 1979.

QUANTITATIVE IN VIVO AUTORADIOGRAPHY WITH POSITRON-EMISSION TOMOGRAPHY. Marcus E. Raichle en *Brain Research Reviews,* vol. 1, n.º 1, págs. 47-68; julio 1979.

REGIONAL ASSESSMENT OF MYOCARDIAL METABOLIC INTEGRITY IN VIVO BY POSITRON-EMISSION TOMOGRAPHY WITH ^{11}C-LABELED PALMITATE. Michel M. Ter-Pogossian, Milton S. Klein, Joanne Markham, Robert Roberts y Burton E. Sobel en *Circulation,* vol. 61, n.º 2, págs. 242-255; febrero, 1980.

MINERIA DEL PETROLEO

MINING FOR PETROLEUM BY UNDERGROUND METHODS. George S. Rice. U.S. Bureau of Mines Bulletin 351, Departamento de Comercio de los Estados Unidos, 1932.

OIL MINING. A TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY STUDY OF OIL PRODUCTION BY MINING METHODS. Anthony Edey, Bruce A. Kennedy y Leigh A. Readdy en U.S. Bureau of Mines Open File Report 55-79, PB 297 134/AS, Golden Associates, 1978.

LA FLOTABILIDAD DEL NAUTILO

CAMERAL LIQUID IN *NAUTILUS* AND AMMONITES. Peter D. Ward en *Paleobiology,* vol. 5, n.º 1 págs. 40-49; invierno de 1979.

FUNCTION OF CAMERAL WATER IN *NAUTILUS*. Desmond Collins, Peter D. Ward y Gerd E. G. Westermann en *Paleobiology,* vol. 6, n.º 2, págs. 168-172; primavera de 1980.

CAMERAL LIQUID TRANSPORT AND BUOYANCY CONTROL IN THE CHAMBERED NAUTILUS (*NAUTILUS MACROMPHALUS*. Lewis Greenwald, Peter D. Ward y O. E. Greenwald en *Nature,* vol. 286, n.º 5768, págs. 55-56; 3 de julio de 1980.

JUEGOS MATEMATICOS

THEORY OF VOTING. Robin Farquharson. Yale University Press, 1969.

THE PRESIDENTIAL ELECTION GAME. Steven J. Brams. Yale University Press, 1978.

TALLER Y LABORATORIO

VISIBLE LASER TRANSITIONS IN Hg^+. W. E. Bell en *Applied Physics Letters,* vol. 4, n.º 2, págs. 34-35; 15 de enero de 1964.

CREATIVE GLASS BLOWING. James E. Hammesfahr y Clair L. Stong. W. H. Freeman and Company, 1968.

LIGHT AND ITS USES: MAKING AND USING LASERS, HOLOGRAMS, INTERFEROMETERS AND INSTRUMENTS OF DISPERSION. T. D. Walker. W. H. Freeman and Company, 1980.